

A C A D E M I E de P A R I S

UNIVERSITE René DESCARTES

Année 1971

N° - 135 -

T H E S E

pour le

DOCTORAT en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le

par

SACHA BOGOPOLSKY

né le 18 Novembre 1918 à Paris - 18ème -

" ETUDE MECANIQUE EN TORSION ALTERNEE DES METAUX "
" "
" DESTINES A L'ELABORATION DES CROCHETS COULES "
" "

Président : M. le Professeur CERNÉA.

A C A D E M I E d e P A R I S

UNIVERSITE René DESCARTES

Année 1971

N° - 135 -

T H E S E

pour le

DOCTORAT en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le

par

SACHA BOGOPOLSKY

né le 18 Novembre 1918 à Paris - 18ème -

" ETUDE MECANIQUE EN TORSION ALTERNEE DES METAUX " "
" DESTINES A L'ELABORATION DES CROCHETS COULES " "
"-----

Président : M. le Professeur CERNÉA.



Président de l'Université René Descartes : M. le Professeur R. FRÉZAL

Chargé de Mission M. LENA (J)

Conserveurs Mlles DUMAITRE (P)

LE NOIR (G)

Bibliothécaires Mmes CONTET (J), FORGET,
VALLIN, DEMANEE

Mlles ROBERGE (D), LE QUANG.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation, ni improbation.

A MON PRESIDENT DE THESE,

Monsieur le Professeur CERNÉA,

Professeur titulaire de la Chaire de Stomatologie
à la Faculté de Médecine de Paris
Membre de l'Académie de Chirurgie
Officier de la Légion d'Honneur,

Vous m'avez accepté et encouragé à préparer cette thèse.
Vous m'avez conduit jusqu'au point final et m'avez fait le grand
honneur de bien vouloir la présider.
Qu'il me soit permis ici, Monsieur le Professeur, de vous
exprimer le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A MES JUGES,

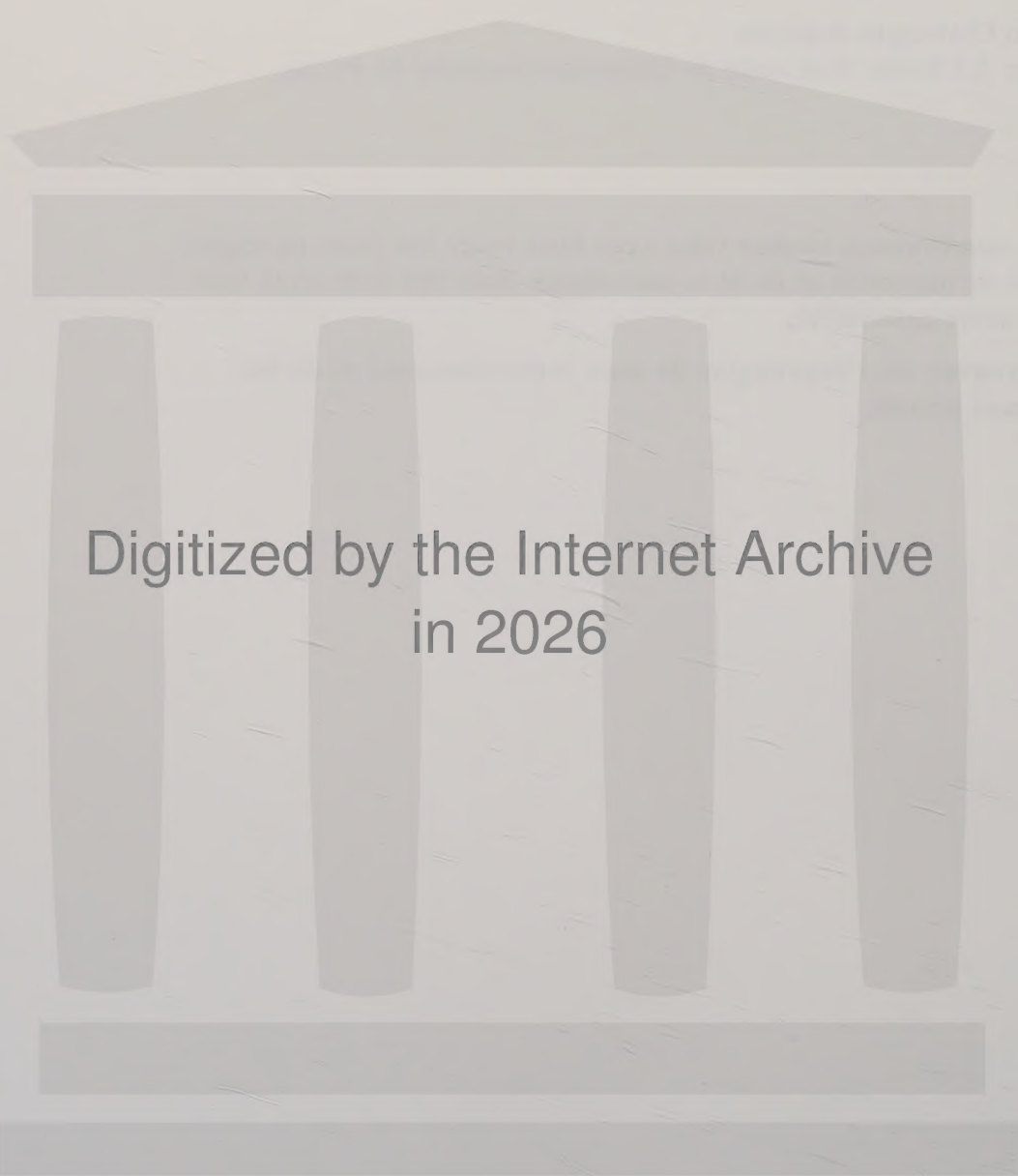
Monsieur le Professeur ROUCOULES,

Docteur en Chirurgie dentaire

Professeur à l'Ecole Nationale de Chirurgie dentaire de Paris.

Depuis de nombreuses années vous avez bien voulu me faire partager votre sens du jugement et de la connaissance dans des domaines très variés de notre spécialité.

Veillez trouver ici l'expression de mes remerciements et de ma respectueuse amitié.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553006_0032

Monsieur le Professeur BURDAIRON,

Docteur en Chirurgie dentaire,

Professeur à l'Ecole Nationale de Chirurgie dentaire de Paris.

Je connais votre souci de la précision et du jugement juste sur les valeurs que l'on soumet à votre connaissance.

Soyez assuré de ma profonde gratitude pour l'aide précieuse que vous avez bien voulu m'apporter.

Monsieur le Professeur MONNIER,

Professeur Chef de Service du Département de la Chimie des Matériaux
de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

J'ai été très honoré de pouvoir mener à bien les travaux entrepris dans
votre laboratoire et sous votre autorité bienveillante.

Vous avez toujours su, avec beaucoup d'indulgence et de compréhension
diriger mes recherches, et accepté de participer à la présentation de
leurs résultats.

Veillez trouver ici l'affirmation de ma profonde reconnaissance et de
mon amitié.

A Monsieur J. BRUGIRARD

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Professeur à l'Ecole Nationale de Chirurgie dentaire de Lyon,
grâce à qui j'ai pu entrer en contact avec la recherche appliquée.
Intéressé par les questions que je me posais, en tant que clinicien,
sur les métaux, il m'a suggéré la voie à suivre..

Qu'il soit assuré de mon amitié sans réserve et de ma reconnaissance.

A Monsieur le Docteur R. VINCENT

Directeur de l'Ecole Nationale de Chirurgie Dentaire de Lyon,
qui, en dépit de ses nombreuses occupations, a su me consacrer
le temps nécessaire pour appuyer les démarches me permettant
de travailler officiellement dans les Laboratoires de l'Institut
National des Sciences Appliquées de Lyon.

Qu'il en soit sincèrement et profondément remercié.

A ma femme,

mes enfants,

mes amis,

qui m'ont supporté dans tous les sens du terme.

I - SOMMAIRE

I - Sommaire

2 - Avant-propos

3 - Introduction

4 - Etude.

1 - ETUDE DES CROCHETS DES APPAREILS DENTAIRES SOUS L'EFFET DE TORSION ALTERNEE.

1-1- CROCHETS ET FATIGUE.

1-2- ELEMENTS DE THEORIE GENERALE SUR LA FATIGUE DES METAUX.

1-2-1 - Définition de la courbe de Woëhler et de la limite de fatigue ou d'endurance.

1-2-2 - Théories mécaniques : de l'hystérésis
de l'écrouissage
de la propagation des fissures
de l'amortissement interne.

1-2-3 - Théories physiques

1-2-4 - Théories statistiques.

1-3- INFLUENCES MECANIKES DES CONDITIONS D'APPLICATION DES EFFORTS SUR LA FATIGUE.

1-3-1 - Influence de la fréquence

1-3-2 - Endommagement par la fatigue

1-3-3 - Influence des contraintes internes ou résiduelles.

1-4 - INFLUENCES PHYSIQUES SUR LA FATIGUE.

1-4-1 - Effet d'échelle

1-4-2 - Effet d'entaille

1-4-3 - Influence de la forme

1-4-4 - Influence de la forme de la section

1-4-5 - Influence des rainures longitudinales

1-4-6 - Influence de l'état de surface.

1-4-7 - Influence de la nature de surface -

1-5 - INFLUENCES CHIMIQUES ET ELECTROCHIMIQUES SUR LA FATIGUE.

1-5-1 - Influence des hétérogénéités de structure.

1-5-2 - Nature des fissures de corrosion par fatigue.

2 - ETUDE DES METAUX UTILISES POUR LA REALISATION DES CROCHETS DES APPAREILS DENTAIRES -

2-1 - APPAREILLAGE -

2-1-1 - micromachine pour l'essai en torsion alternée.

2-1-2 - microscope électronique à balayage.

2-1-3 - technique de polissage des éprouvettes.

2-2 - MATERIAUX ET TECHNIQUES UTILISES POUR LA REALISATION DES EPROUVETTES -

2-2-1 - métaux utilisés

2-2-2 - revêtements pour la coulée

2-2-3 - technique de coulée

2-2-4 - tableau comparatif des propriétés physiques des métaux utilisés

2-2-5 - préparation de l'éprouvette à partir du cylindre brut de fonderie.

2-3 - DESCRIPTION DES EXPERIENCES -

2-3-1 - manipulations préliminaires

2-3-2 - ressuage

2-3-3 - essais sur machine à torsion alternée

2-3-4 - étude du facies des fractures

2-3-5 - observation de la microstructure des alliages étudiés.

2-4 - RESULTATS -

2-4-1 - Alliages chrome-cobalt -

2-4-1-1 - Tableau des résultats.

2-4-1-2 - Courbes de Woehler.

2-4-1-3 - Micrographie de structure.

2-4-1-4 - Microfractographies prises au microscope
électronique à balayage.

2-4-1-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle
d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.

2-4-2 - Alliages nickel-chrome -

2-4-2-1 - Tableau des résultats.

2-4-2-2 - Courbes de Woehler.

2-4-2-3 - Micrographie de structure.

- 2-4-2-4 - Microfractographies prises au microscope électronique à balayage.
- 2-4-2-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.
- 2-4-3 - Alliages d'ors -
 - 2-4-3-1 - Tableau des résultats.
 - 2-4-3-2 - Courbes de Woehler.
 - 2-4-3-3 - Micrographie de structure.
 - 2-4-3-4 - Microfractographies prises au microscope électronique à balayage.
 - 2-4-3-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.

3 - INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS -

3-1 - INTERPRETATIONS -

- 3-1-1 - alliage chrome-cobalt
- 3-1-2 - alliage nickel-chrome
- 3-1-3 - alliage d'or
- 3-1-4 - courbe de frottement interne
 - 3-1-4-1 - variation en fonction du nombre de cycles
 - 3-1-4-2 - variation en fonction de l'amplitude
 - 3-1-4-3 - comparaison chrome-cobalt, nickel-chrome et or.

3-2 - CONCLUSIONS -

4 - ANNEXES -

- 4-1 - Bibliographie
- 4-2 - Cycles de contraintes avec notation algébrique - Recommandation I.S.O. R 373.
- 4-3 - Résistance à la fatigue - Recommandation I.S.O. R 373.
- 4-4 - Spécification n° 7 F D I 1963 sur les ors.

5 - TABLE DES MATIERES -

- 2 - AVANT-PROPOS -

A travers la connaissance de la clinique, l'enseignement de la prothèse nous a conduit à l'étude des matériaux utilisés pour l'élaboration des constructions prothétiques.

Nous n'insisterons jamais assez sur la nécessité de la liaison qui doit exister entre la clinique et les recherches réalisées dans les départements des matériaux dentaires.

C'est grâce à l'obligeance de M.G. MONNIER, Professeur dirigeant le Département de la Chimie des Matériaux, que M.R. BARGAIN, Ingénieur de ce département, a pu me guider et diriger mes investigations.

Nous avons trouvé auprès de lui un concours entier qui a su résoudre avec une grande rigueur d'esprit, et une compréhension de plus en plus profonde des problèmes dentaires, les points particuliers que nous voulions élucider, à travers cette démarche d'une étude encore originale.

Qu'il soit assuré de notre profonde reconnaissance.

Monsieur le Professeur UZAN, qui dirige le Laboratoire des émissions électroniques du Département de la Physique des Matériaux de la Faculté des Sciences de Lyon, a bien voulu accepter de nous prêter son concours infiniment précieux à la poursuite de notre recherche : il nous a permis de contrôler notre travail grâce à l'utilisation du microscope électronique à balayage. Qu'il soit ici persuadé de notre profonde gratitude.

Monsieur le Professeur GOBIN, de l'Institut National des Sciences Appliquées nous a aidés sur l'interprétation des résultats iconographiques, nous l'en remercions vivement.

Cette suite d'opérations successives aurait été interrompue si nous n'avions trouvé, au cours d'incidents techniques, une grande gentillesse, et une non moins grande ouverture d'esprit auprès de M. BIERI, et de M. OUDOT, Ingénieur du Polytechnicum de Zurich à la Chaux-de-Fonds : qu'ils trouvent ici l'expression de nos chaleureux remerciements pour le concours précieux qu'ils nous ont apporté avec leur appareillage.

Nous tenons également à remercier M.H. REY, Ingénieur et M. ANDRIES, Ingénieur de Recherche à Grenoble de l'aide amicale qu'ils nous ont manifestée en acceptant toujours de répondre aux questions que nous leur posions au sujet de nos travaux.

Nous nous en voudrions de ne pas citer M. J.C. NINEY, Ingénieur Métallurgiste, ainsi que MM. SALON, ROBAIL et ROYER qui, chacun dans leur spécialité, nous ont permis la réalisation technique de cette thèse : qu'ils soient assurés de notre amicale reconnaissance.

- 3 - INTRODUCTION -

La recherche des exigences cliniques et métallurgiques, qui constitue pour F.R. MORRAL, "le génie biologique" et qui pourrait correspondre chez nous à l'expérience d'un bio-ingénieur, nous a poussé à étudier plus particulièrement les ruptures constatées sur des crochets d'appareils métalliques.

Ce problème a pris entre 1920 et 1930 une certaine acuité en raison du remplacement des crochets en fil étiré ou en plaque estampée, par des crochets coulés.

Les fils étirés ou laminés, anisotropes, présentent une résistance plus grande dans l'axe du travail de transformation : la texture fibreuse, par suite de l'orientation des dendrites, se trouve dans le sens de l'écoulement du métal.

Le crochet coulé par contre, isotrope par compensation, présente les mêmes propriétés dans toutes les directions.

Les qualités qui seront demandées à ces métaux coulés touchent à la fois à la mécanique des structures, à l'amplitude et à la direction des efforts appliqués, et enfin aux capacités des matériaux à résister aux charges. Ces différents paramètres seront l'occasion de discussions sur les modes de rupture constatés, et nous aborderons seulement les ruptures des crochets provoquées à la limite de fatigue.

La résistance à la fatigue en torsion alternée d'un alliage est fonction de conditions déterminées et seulement à une fraction de la limite élastique. La sévérité des contraintes répétées auxquelles se trouve soumis le matériau affectera aussi sa durée de vie. Or, à notre connaissance, nous constatons, à travers la bibliographie, que seule, a été décrite, l'étude en flexion alternée des matériaux les plus utilisés dans nos applications.

Dans la recherche que nous essayons de réaliser, nous voulons caractériser les limites de fatigue, uniquement en torsion alternée. Les crochets subissent des efforts lors de la mastication, de l'insertion et de la désinsertion de la plaque prothétique, et doivent alors supporter ces mouvements sans rupture due à la fatigue.

Nous allons faire une étude comparative dans ce domaine de trois métaux les plus couramment employés et tenter de tirer des conclusions pour leur application pratique en fonction des perfectionnements technologiques actuels.

-1- - ETUDE DES CROCHETS DES APPAREILS DENTAIRES SOUS L'EFFET DE TORSION ALTERNEE -

-1-1 - CROCHETS ET FATIGUE -

On constate souvent des fractures d'éléments coulés de prothèse amovible en cours d'usage. Ces fractures résultent des efforts qui agissent sur les diverses parties de la prothèse lors de la mastication ou de la déglutition. Nous pouvons citer en particulier des ruptures au niveau des différentes parties du crochet. Ces fractures se produisent, soit au niveau de la partie active, soit au niveau de la liaison rigide avec la plaque, soit même en dehors des crochets au niveau des barres cingulaires.

Le crochet est un dispositif à encastrement qui assure la rétention des prothèses partielles amovibles (la rétention étant réalisée par tous les éléments qui s'opposent aux forces d'arrachement). Il comprend différentes parties :

- le corps
- le bras
- l'étai
- le taquet
- la potence.

Il doit s'opposer aux forces latérales de cisaillement et aux forces verticales de déplacement. Il doit donc offrir la rétention maximum qui sera d'autant plus importante que la restauration se rapprochera de la prothèse fixe et en même temps le minimum de risques de léser la dent ou la muqueuse. La contrainte imposée à la dent lors de la désinsertion sera d'autant plus importante que la rétention sera plus rigide. Les propriétés que doivent posséder les crochets sont les suivantes :

A) Propriétés mécaniques

- a) haute limite élastique
- b) dureté élevée
- c) possibilité de modification par traitement thermique.

B) Propriété électro-chimique

résistance à la corrosion.

C) Propriété biologique

compatibilité entre le matériau et le milieu biologique.

Il existe de nombreuses formes de crochets qui répondent plus particulièrement à chaque cas posé et nous citerons pour mémoire ceux de Ney dérivés de ACKERS :

- Roach
- Kennedy
- Jackson
- à barre de torsion de MASSERAN
- etc.



Les crochets sont constitués par une partie rigide ou élément de stabilisation et d'une partie flexible ou élément rétentif formé par la partie extrême du bras du crochet (on augmente la flexibilité de celui-ci en éloignant au maximum sa liaison avec la plaque base). Au cours de la mastication et de la déglutition les crochets subissent (1500 fois par jour en moyenne) des efforts dirigés dans les trois plans de l'espace pendant une durée variant de 1 seconde à 1/100 de seconde ce qui présente plus ou moins d'importance suivant :

- a) le cas d'édentation et son asymétrie
- b) la valeur de l'engrènement intercuspidien
- c) la force musculaire existante.

En fonction de ces efforts, les crochets doivent répondre à deux sollicitations :

- a) une normale
- b) une tangentielle.

Les composantes provoquent sur la prothèse amovible des mouvements de rotation telle qu'une pression exercée sur un côté provoque un déplacement de l'autre côté autour d'un axe de rotation ainsi que le montre BATES (British Dental Journal Août 68). On peut même ajouter que la résorption des muqueuses sera d'autant plus accélérée que le mouvement de rotation verticale autour de l'axe des crêtes permettra l'action des forces obliques traumatisantes.

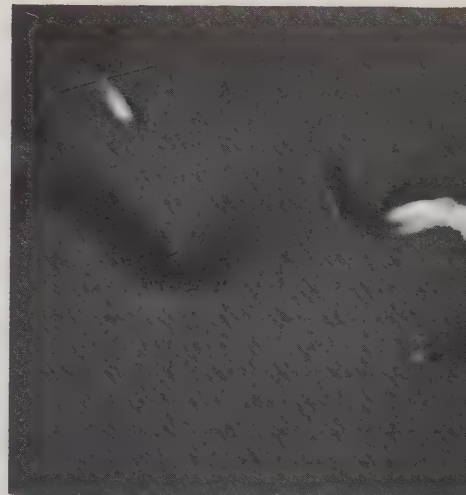
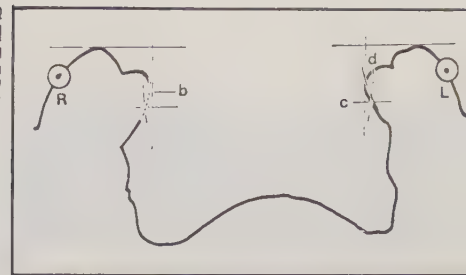
Malgré les moyens modernes d'élaboration, nous pensons qu'il existe encore une certaine imprécision dans la production des prothèses amovibles métalliques. Ce manque de précision lié aux problèmes complexes de rétention suggère que la rétention initiale d'une prothèse serait due à la résistance de frottement de la selle et des différentes parties constituant le crochet. On a pu démontrer que l'on avait jusqu'à 0,7 mm d'espace entre la dent et le crochet.

D'autre part, en relation avec le haut module d'élasticité des alliages chrome-cobalt OSBORNE & LAMMIE préconisent une réduction de la section et un allongement du bras du crochet par rapport à ceux requis pour les crochets en or. HARCOURT a étudié 31 cas de fractures de plaques métalliques coulées et il donne les statistiques suivantes :

- 1 barre linguale
- 1 crochet continu
- 2 selles linguales
- 3 taquets occlusaux
- 4 anneaux de Roach
- 4 crochets anneaux
- 19 crochets à 3 bras,

ce qui lui a permis à la suite d'une étude métallographique de

BATES



ces fractures de donner les conclusions suivantes :
les fractures seraient dûes :

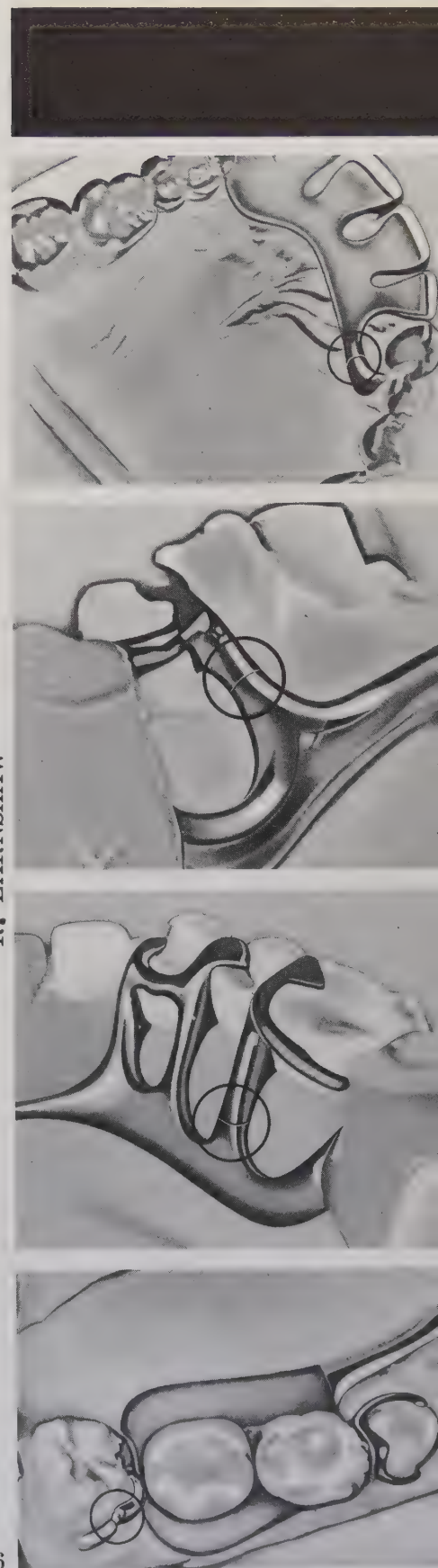
- a) à des défauts de coulée
- b) à la taille des grains diminuant en fonction de la réduction de la section des crochets. (cristallisation).
- c) dans le cas de rupture, les plus fréquentes sont situées à la jonction de la partie occlusale, soit au niveau de l'appui ou du bras du crochet.
- d) à ce que les parties les plus minces du crochet sont les plus fragiles lorsqu'il y a modification dans la largeur de celui-ci.

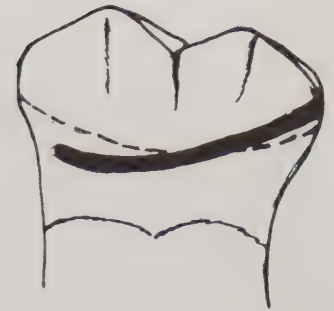
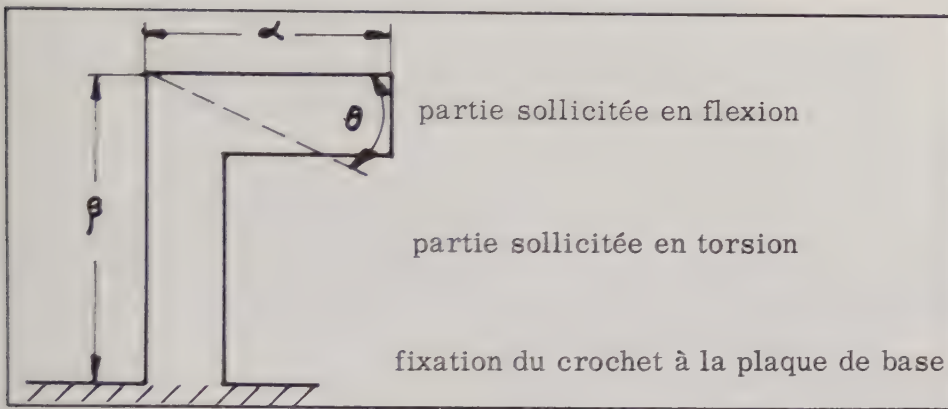
HARCOURT (British Dental Journal Janvier 69) signale également des défauts existants de structure. Dans 21 coulées de chrome-cobalt, après étude sur microphotographies, il signale :

- très petites inclusions 4
- petites inclusions 11
- grandes inclusions 4
- sans inclusions 2
- porosité due à la contrainte 4
au gaz 6
- petits carbures : 10
- gros carbures : 11
- petits grains : 9
- grains en colonne : 4
- larges grains : 15
- très petites dendrites : 3
- petites dendrites : 18
- larges dendrites : 0

En résumé sans exercer de forces nocives sur la dent, le crochet doit assurer la rétention de la prothèse par la partie agissante sous la ligne de grand contour déterminé au paralléliseur ; être suffisamment flexible pour s'ouvrir en franchissant le bombé de la dent afin de reprendre chaque fois sa forme initiale (forme à section semi-circulaire de 0,25 mm et de longueur moyenne de 10 à 15 mm qui correspond aux exigences demandées en flexion à travers les études réalisées actuellement).

Les efforts qui agissent sur les crochets sollicitent ceux-ci en flexion, c'est une des raisons pour que toutes les études faites jusqu'à présent sur la fatigue l'aient été en flexion alternée. On peut cependant montrer que dans le cas de certains crochets, l'influence des couples de torsion est loin d'être négligeable. Considérons par exemple un crochet de Roach, un déplacement vertical de la pointe du crochet entraîne à cause du bombé de la dent l'existence d'une force dont une composante F_1 sollicite en torsion une partie du bras du crochet. On peut dans le cas particulier comme celui de Roach, représenter schématiquement et pour simplifier le



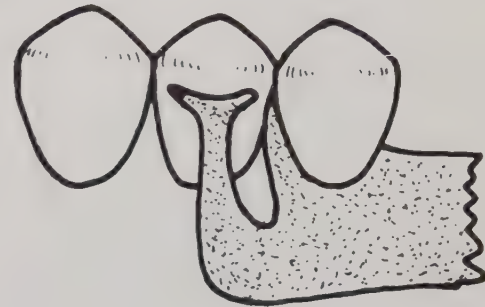


crochet par une potence rectangulaire et admettre que l'influence des composants autres que F_1 est négligeable, (cas en mécanique d'une console encastrée).

D'une part, la force F_1 provoque une flexion de flèche x . Le couple $y = F_1 l$ sollicite en torsion d'angle θ la partie β par l'intermédiaire de la partie α .

Comme les angles et les déplacements sont très faibles on a $\theta = \frac{y - x}{l}$ et ceux-ci conduisent à $\theta = \frac{Kl}{Kl^2 + C} y$

D'autre part, nous donnons une valeur moyenne du bras du crochet $(\alpha + \beta) l = 1,5 \text{ cm}$ et de $\alpha l = 1,0 \text{ cm}$. Si nous considérons la partie α de section rectangulaire de largeur $b = 0,2$ et d'épaisseur $d = 0,1$ une formule de Bates (références : British Dental Journal Novembre 1965) donne : $E = (C_u - C_s) = 2 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$. Nous pouvons calculer la pente $K = \frac{\text{Force}}{\text{Flèche}} = \frac{Eb d^3}{4 l^3} = 10^2 \text{ kg/cm}$.



Nos éprouvettes sont deux fois plus longues que la partie β mais ont une surface de section à peu près deux fois plus importante que celle que l'on trouve ordinairement dans les crochets. Nous pouvons donc considérer que les valeurs du couple C obtenues lors de nos manipulations donnent un ordre de grandeur de la valeur de celui-ci

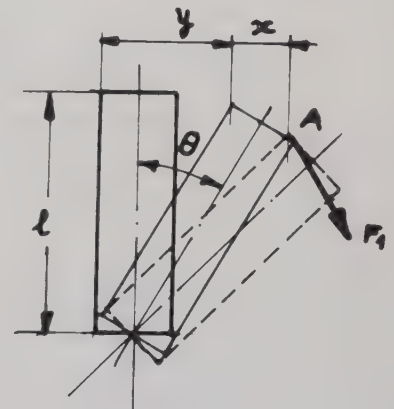
$$C \approx 400 \text{ kgs-cm/rd.}$$

De nombreux auteurs (Réf. Bates-Harcourt) considèrent que le déplacement maximum de la pointe du crochet est égal à $y = 0,01 \text{ cm}$, nous en déduisons une valeur de :

$$\theta = 2 \times 10^{-3} \text{ rd}$$

$$x = y - l = 8 \times 10^{-3} \text{ cm.}$$

$$F = Kx = 0,80 \text{ kg f.}$$



Nos approximations semblent raisonnables car nous arrivons à une valeur vraisemblable de la force. La valeur très faible de θ indique qu'en fait, il semblerait peu probable que les crochets se rompent en bouche uniquement par torsion.

C) Théorie de la propagation des fissures.

L'endurance (dans un milieu se déformant plastiquement) est surtout déterminée par la loi de propagation des fissures plutôt que par la contrainte nécessaire à leur formation ; on détermine 3 stades :

a) une déformation se produit dans tout le volume du métal jusqu'à ce que le durcissement corresponde au niveau de l'effort appliqué.

b) des régions isolées sont le siège de déformations lentement croissantes et une fissure apparaît pour provoquer le 3ème stade.

c) des micro-fissures se développent en macrofissures. En effort de torsion, les fissures sont issues d'un joint unique et forment un réseau en étoile ou en croix.

D) Théorie de l'amortissement interne.

Chaque métal n'est capable de dissiper qu'une certaine quantité d'énergie par amortissement interne et si cette limite est dépassée, la rupture par fatigue survient.

Cet amortissement est dû à l'existence d'un frottement intérieur. Ce frottement intérieur peut être défini également par la propriété que possède un corps solide d'absorber de l'énergie quand il subit des contraintes cycliques. Il est une des raisons des écarts à l'élasticité.

Une déformation est parfaitement élastique lorsque la courbe représentant l'effort en fonction de cette déformation peut être parcourue dans les deux sens, un parcours n'entraîne aucune absorption d'énergie. Dans le cas contraire on dit qu'il y a hystérésis : la courbe n'est pas réversible et en décrivant le cycle on absorbe de l'énergie.

Comment se fait-il qu'un métal chargé au-dessous de sa limite d'élasticité puisse se rompre puisqu'il ne devrait absorber aucune énergie ? C'est parce que l'hypothèse du solide parfaitement élastique n'est qu'une approximation. Tout cycle mécanique même fort peu étendu est toujours affecté d'hystérésis et en outre (dixit P. CHEVENARD) la déformation permanente n'est jamais rigoureusement nulle. Seule la méthode de l'amortissement peut la déceler.

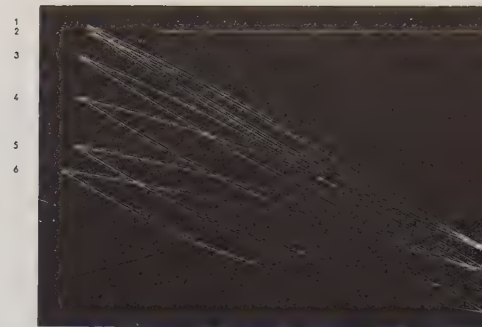
Mesure du décrément des oscillations libres :

$$\text{décrément} = \delta = \frac{\Delta x}{x}$$

x = amplitude de l'oscillation

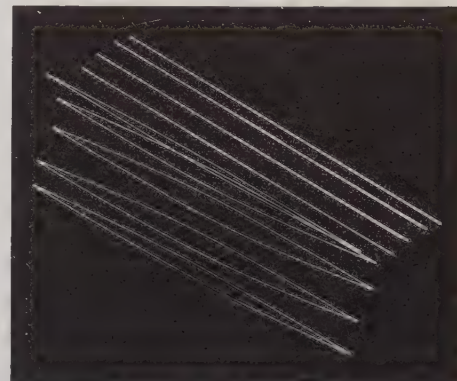
Δx = différence entre 2 amplitudes consécutives.

C'est le décrément qui exprime le frottement intérieur dans toutes les méthodes basées sur la mesure de la décroissance des vibrations de torsion.



Cycles couple-torsion enregistrés sur une même éprouvette d'acier à outils à 1 % de carbone.
Amplitude : 0,066 radian.

78.000 alternances



Cycles couple-torsion enregistrés sur une même éprouvette d'acier à outils à 1 % de carbone.
Amplitude : 0,038 radian.

$10 \cdot 10^6$

GARDY-TAREX Genève

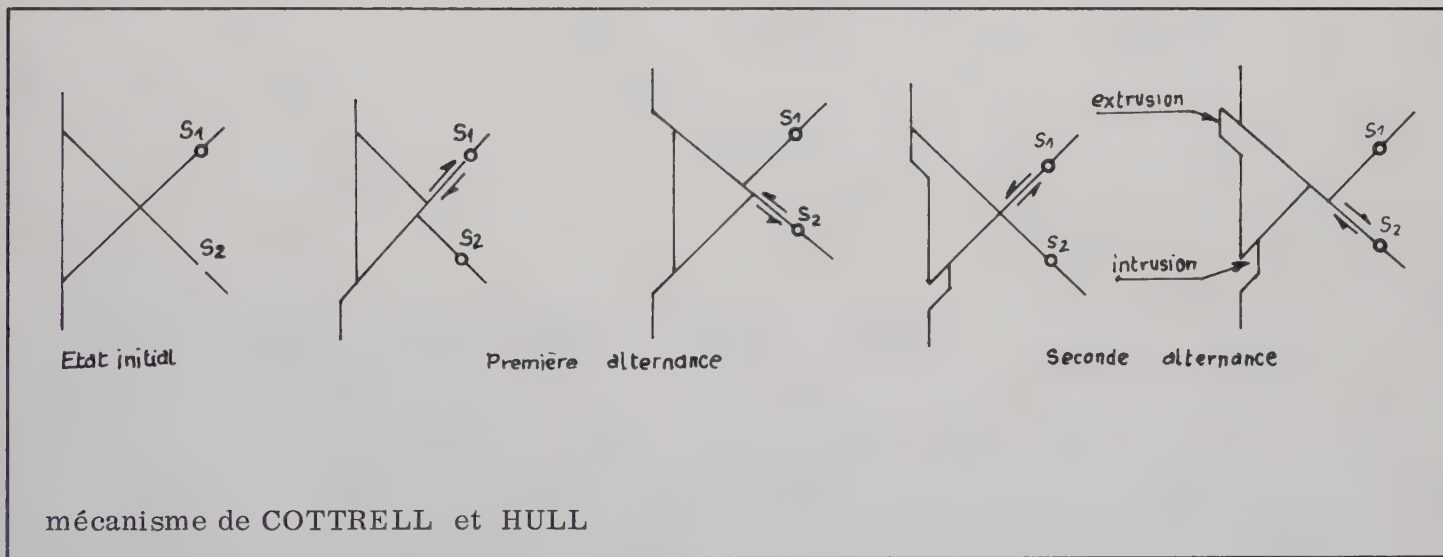
Mesure de l'énergie dissipée par cycle de torsion alternée

L'énergie dissipée est proportionnelle à la surface du cycle force-déformation. Le quotient de cette perte par le double de l'énergie élastique maximum au cours d'un cycle mesure le frottement intérieur et correspond au décrément des oscillations libres. La micromachine que nous utilisons permet d'étudier les modifications des cycles avec le nombre d'alternances et avec les facteurs mécaniques.

A charge de rupture égale, un métal à capacité d'amortissement élevée a une meilleure tenue en fatigue qu'un métal à faible capacité d'amortissement car le premier se révèle beaucoup moins sensible aux effets d'entaille. Le métal à fort amortissement sera aussi plus apte à supporter des surcharges accidentelles dues aux phénomènes de résonance (vitesse critique) qui peuvent survenir dans certaines conditions de service où la contrainte maximale n'est limitée alors que par l'amortissement propre du métal.

-1-2-3- Théories physiques.

On admet que les "intrusions" sont responsables de la formation des fissures. Mécanisme fondé sur la théorie des dislocations.



A chaque alternance de l'effort le signe des dislocations engendrées par les sommes S_1 et S_2 s'inversent et il y a formation d'une intrusion et d'une extrusion.

L'hypothèse de Wood tient compte des effets différents que doivent produire les contraintes statiques et dynamiques : sous l'action de contraintes statiques, les glissements sur les plans d'un même système ont lieu dans le même sens (dessin a).

Lorsque les contraintes sont périodiques, les amplitudes des glissements sont distribuées au hasard (dessin b). Wood suppose alors que les vallées formées ont tendance à se creuser sous l'influence de la concentration des contraintes apparaissant au fond.

C'est à partir de l'observation du profil des stries révélées par microfractographies sur les surfaces de rupture par fatigue que l'on peut bâtir le mécanisme de la propagation de celle-ci. Le mécanisme doit tenir compte des différents stades de propagation obtenus soit :

1) en fonction du nombre de cycles

2) en fonction du niveau de contrainte, ainsi que la variation cyclique de cette contrainte.

En conclusion on peut dire que lorsque la contrainte croît, la fissure s'ouvre, s'allonge et son extrémité s'émousse par relaxation plastique.

Lorsque la contrainte décroît, la fissure se referme mais son extrémité s'aiguise.

1-2-4 - Théories statistiques -

Malgré tous les efforts réalisés par les expérimentateurs, on constate une dispersion des résultats lors des essais de fatigue. On représente la durée de vie d'une éprouvette pour une contrainte S non pas par un point mais par une distribution de points. Cette courbe est la courbe de WOEHLER.

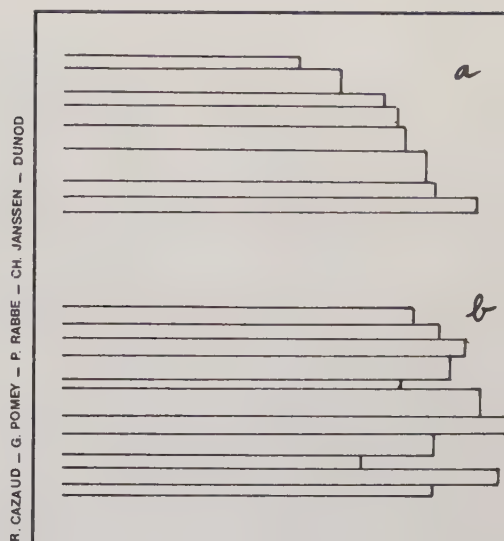
On s'accorde pour dire que la fatigue est un phénomène, par lui-même dispersé, qui peut conduire à la formation d'une fissure dont l'extension est gouvernée par une succession d'évènements à l'échelle submicroscopique et, par nature, aléatoires.

La plupart des théories statistiques admettent l'hétérogénéité du matériau comme cause essentielle de la dispersion et tiennent à prévoir la forme du diagramme de Woehler à partir de raisonnements purement statistiques.

D'autres théories sont nées des deux hypothèses suivantes :

-1) - La résistance à la fatigue de toute portion d'éprouvette est aléatoire.

-2) - On peut diviser une éprouvette en un grand nombre de fragments dont les résistances à la fatigue sont indépendantes en probabilité, et dont la rupture d'une des parties entraîne celle de l'ensemble. Aucune chaîne n'est plus forte que son maillon le plus faible.



R. CAZAUD - G. POMEY - P. RABBE - CH. JANSSEN - DUNOD

-1-3- INFLUENCES MECANQUES DES EFFORTS SUR LA FATIGUE -

-1-3-1 - Influence de la fréquence -

Les fréquences moyennes et élevées en flexion rotative sur éprouvettes lisses et entaillées montrent qu'autour de 50 millions de cycles on élève de 2 % à 35 % suivant le métal la limite d'endurance lorsque l'on passe de 1500 cycles/mn à 3000 cycles/minute.

On conçoit que le facteur temps intervient dans le phénomène de fatigue, et que plus la période est courte, moins grande est la déformation.

-1-3-2 - Endommagement par fatigue -

Le dommage par fatigue ne peut pas être décrit dans de nombreux cas par un paramètre unique mais dépend de plusieurs paramètres et de leur répartition statistique en intensité et en localisation.

Selon que le métal subit des contraintes de surcharge à deux niveaux distincts, d'abord élevé, puis plus faible ou inversement, l'allure du dommage est très différente. On distingue dans la courbe de dommage de Woëhler quatre zones :

I) Zone supérieure qui correspond à des conditions pour lesquelles les éprouvettes seront rompues et une zone inférieure correspondant aux éprouvettes non rompues : la courbe A sépare les deux zones.

II) FRENCH, (Fatigue et Durcissement des Aciers

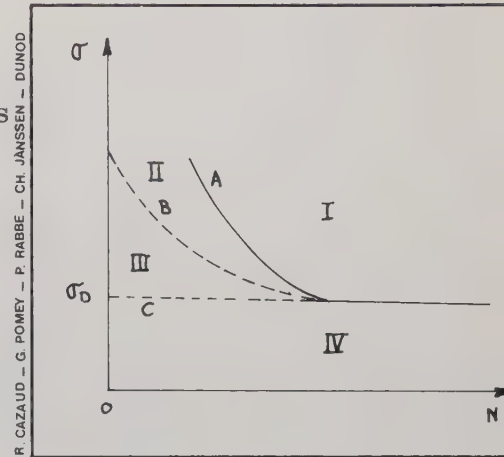
Trans. Am. Ste STEEL Treating- Vol. 21-P. 899 Oct. 1933-) distingue dans la zone inférieure à la courbe A deux nouvelles zones :

a) la zone II qui correspond à un endommagement du métal par surcharge tel que sa limite d'endurance alternée soit abaissée.

b) la zone III qui correspond à une amélioration plus ou moins importante de l'endurance suivant la valeur de l'effort (sous charge).

Entre les courbes A et B les fissures se développent jusqu'à rupture. Au-dessous de la courbe B, les microfissures ne se développent pas forcément. On peut admettre que l'effet d'entaille est compensé par la relaxation des déformations plastiques. La courbe B est appelée courbe de dommage.

La suppression momentanée des efforts alternés n'a pas d'influence sur la courbe d'endurance. Cependant à certaines périodes, on constate qu'il est avantageux de faire reposer les pièces qui ont subi des efforts alternés importants car on augmente le nombre de cycles avant rupture. Ceci s'expliquerait par un phénomène de vieillissement après écrouissage que l'on attribue par exemple aux précipitations de carbure et de nitrure dans les aciers.



-1-3-3 - Influence des contraintes internes ou résiduelles

Les contraintes internes se superposent aux contraintes appliquées pour donner la contrainte réelle s'exerçant en un point de la pièce et en particulier de sa surface. Elles ont donc une influence sur l'endurance.

On distingue : les microcontraintes provenant des hétérogénéités des microstructures.

les macrocontraintes d'origine externe développées par une distribution non uniforme des déformations dues à la température.

En étudiant uniquement les macrocontraintes résiduelles d'origine externe, on s'aperçoit qu'elles peuvent être la cause de rupture imprévue des pièces, si on n'estime pas à l'avance leurs grandeurs et leurs directions et même dans certains cas elles peuvent être favorables à l'endurance.

a) contraintes internes d'origine mécanique

Le redressement des pièces cintrées par exemple au cours du traitement thermique est nettement défavorable à la résistance à la fatigue car on crée sur l'une des fibres des contraintes résiduelles de torsion. Avec un jet de sable (neuf surtout) on produit un martèlement plus profond de la surface et les angles aigus peuvent créer de minuscules entailles, le sablage humide (projection de sable très fin en suspension dans l'eau contenant un inhibiteur de corrosion) a permis d'après Cazaud d'élever de 25 % l'endurance en flexion plane alternée d'éprouvettes en Duralumin de 4 mm d'épaisseur grâce aux précontraintes de compression qu'il développe.

b) contraintes internes d'origine thermique

Dans le cas de trempe, le refroidissement rapide en-dessous de la courbe A améliore l'endurance en flexion rotative.

Dans le cas du revenu, il y a avantage à terminer le traitement par un refroidissement à l'eau.

Pour un acier chrome-V on trouve pour un refroidissement après revenu sur une éprouvette lisse :

- 1) à l'air 60 kgf/mm² limite d'endurance
- 2) à l'eau 65 kgf/mm².

c) modifications des contraintes internes par fatigue

Wood (Journal of the Institute of metal vol 91 n° 6 -1963 p.p. 193-196) a pu montrer que les précontraintes macroscopiques introduites par une prédéformation statique ou dynamique disparaissent rapidement après quelques centaines de cycles. Il subsiste par contre, un durcissement du métal produit par l'écrouissage préalable, qui résulte de la présence de microcontraintes internes et qui seraient responsables de l'amélioration de l'endurance.

d) contraintes accompagnant les dépôts électrolytiques
Les dépôts électrolytiques qui améliorent les états de surface s'accompagnent en général d'une diminution sensible de l'endurance. Les dépôts sont le siège de contraintes internes. Pour les dépôts de Nickel épais Cazaud a trouvé pour des éprouvettes en acier doux essayées en flexion rotative une diminution de la limite d'endurance de 40 %. Pour le chrome les contraintes de torsion peuvent atteindre 35 kgf/mm² et la résistance à la fatigue serait diminuée de 15 %. On sait que suivant les conditions d'électrolyse, les propriétés mécaniques du métal déposé sont très différentes.

-1-4 - INFLUENCES PHYSIQUES SUR LA FATIGUE -

-1-4-1 - Effet d'échelle -

a) par sollicitations uniformes

Il faut entendre par là, une sollicitation axiale de traction ou de compression agissant normalement à une section sans entaille d'un matériau homogène.

Il dépend de : l'état de surface (irrégularité d'usinage)
du rapport de la surface au volume
de l'hétérogénéité du matériau.

b) par sollicitations non uniformes

Dans le cas de la flexion alternée ainsi que pour la torsion, l'effet d'échelle est appréciable.

La limite d'endurance diminue quand le diamètre augmente. Cet effet est attribué au gradient de contrainte existant entre la fibre externe et la fibre neutre (voir le problème de l'adaptation).

-1-4-2 - Effet d'entaille -

En présence d'une entaille, les métaux se comportent très différemment suivant qu'ils ont une plus ou moins grande capacité de déformation permanente. Dans tous les cas la limite d'endurance est réduite en présence d'une entaille mais son influence est d'autant plus grande que le métal a une faible capacité d'adaptation.

-1-4-3 - Influence de la forme -

a) réduction de la limite d'endurance apportée par un changement de section.

Les éprouvettes toriques donnent des limites d'endurance nettement supérieure aux éprouvettes cylindriques correspondantes.

L'influence des stries est faible en regard de celle de la forme.

b) Influence des congés

L'influence prédominante est celle du rayon de congés de raccordement.

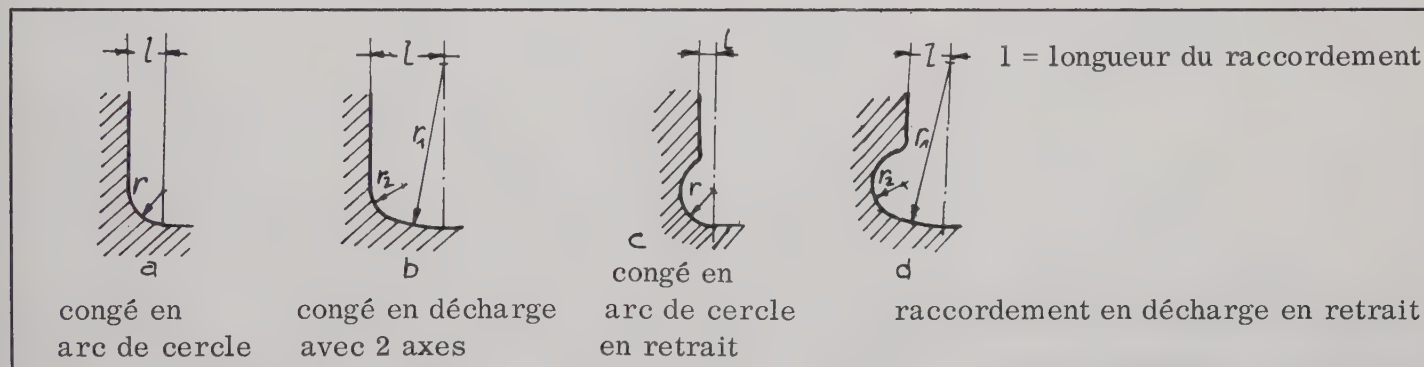
Les congés sont exécutés après le traitement de trempe. Dans le cas où ils sont usinés avant la trempe leur influence est beaucoup plus importante.

Le rapport du rayon du congé r et du petit diamètre d détermine la valeur de K_t . La réduction de la limite d'endurance peut atteindre pour divers aciers :

Rapport r/d	Diminution de D en %
0,1	15 - 80
0,2	10 - 28
0,4	2 - 10
1	0,5 - 6

l'influence des congés joue pour les sollicitations en torsion alternée comme pour les sollicitations en flexion alternée. L'écrouissage superficiel durcit le métal et développe des précontraintes de compression qui permettent d'améliorer considérablement l'endurance des arbres à changement de section. Il arrive la plupart du temps que la rupture ait lieu en dehors du congé ce qui démontre bien l'efficacité du procédé.

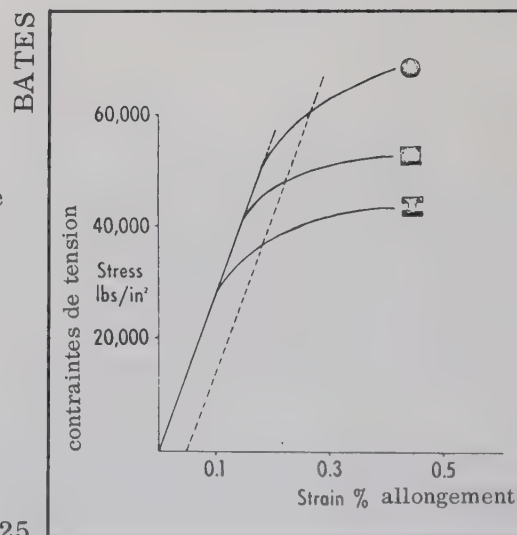
R. CAZAUD — G. POMEY — P. RABBE — CH. JANSSEN — DUNOD



Lorsque l'on combine l'effet d'entaille et l'effet de congé, les résultats montrent que la réduction de la limite d'endurance correspond sensiblement au produit de la réduction apportée par chaque effet séparément.

-1-4-4 - Influence de la forme de la section -

L'expérience montre que pour des pièces travaillant en flexion alternée et présentant une arête extérieure, la cassure s'amorce sur cette arête. L'effet d'arête joue également pour les trous dont l'orifice est laissé à bord vif. La limite d'endurance est légèrement abaissée quand on passe des sections rondes aux sections carrées et Bates (British Dental Journal Nov. 1965) a étudié l'action des contraintes sur les sections différentes dont les contraintes ont un effet en relation avec le dessin du crochét. La conclusion de son étude ainsi que la courbe qu'il a établie donne le maximum de résistance aux crochets de section circulaire ou semi-circulaire.



-1-4-5 - INFLUENCE DES RAINURES LONGITUDINALES -

L'influence défavorable à la forme b s'explique du fait que la pointe de contrainte est plus forte au fond et à l'extrémité de la rainure et que l'usinage ne peut être fait qu'avec une fraise travaillant en bout qui donne des stries circulaires, alors que dans la forme a, l'usinage se fait avec une fraise donnant des stries longitudinales incontestablement meilleures. L'expérience montre, que non seulement il est important d'arrondir les angles, mais encore d'abattre les arêtes des bords extérieurs et d'usiner les surfaces avec soin. Même recommandation pour les cannelures multiples, le fait d'adopter les flancs arrondis au lieu de flancs droits abaisse le coefficient de forme K_t . Les flancs arrondis accompagnés d'une gorge au fond des cannelures donnent au coefficient K_t la valeur 1, c'est-à-dire, qu'ils suppriment les concentrations de contrainte.

-1-4-6 - Influence de l'état de surface -

Les pièces usinées grossièrement se rompent par fatigue, plus vite que les pièces parfaitement polies. Les rayures, même peu profondes (faites par une éraflure d'outil) peuvent agir sur l'endurance. Les stries produites par l'émeribien que peu profondes, font observer que les cassures ont bien souvent la direction des stries. Leur sens est important car les rayures circonférencielles sont plus nocives que les stries longitudinales. La résistance à la fatigue n'est malgré tout pas directement proportionnelle à la rugosité, mais dépend du profil réel de la surface. C'est l'acuité des entailles et leur écartement qui conditionnent la baisse d'endurance par effet d'entaille. Pour les métaux légers, on aura intérêt à faire suivre la rectification d'un polissage fin et longitudinal. A égalité de rugosité la supériorité que présente le poli mécanique sur le poli électrolytique n'est due qu'à la présence favorable des contraintes développées par l'écrouissage superficiel. Les opérations de décapage par attaque des pièces par des acides ou par l'opération de sablage permet d'altérer leur surface et affecter la résistance à la fatigue, mais intervient très peu sur la limite d'endurance.

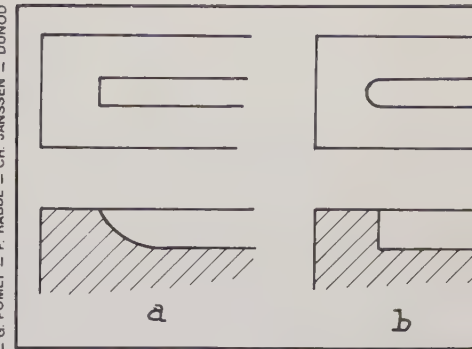
-1-4-7 - Influence de la nature de surface -

a) le durcissement

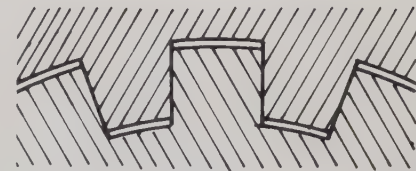
Le durcissement de la surface par les divers procédés d'écrouissage entraîne une augmentation de l'endurance dans la mesure où les précontraintes sont favorables.

b) l'adoucissement

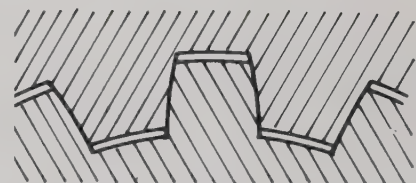
R. CAZAUD - G. POMÉY - P. RABBE - CH. JANSSEN - DUNOD



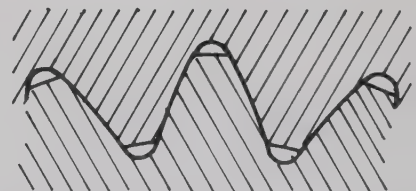
R. CAZAUD - G. POMÉY - P. RABBE - CH. JANSSEN - DUNOD



a) flans droits : $K_t = 2,1$



b) flancs arrondis : $K_t = 1,8$



c) cannelures arrondies : $K_t =$

K_t : coefficient de forme

Un dépôt de métal plus mou abaisse l'endurance. Un traitement mal effectué conduit à un grossissement superficiel du grain, ou bien une surchauffe produisant une brûlure locale, adoucissant la surface diminue l'endurance.

-1-5 - INFLUENCES CHIMIQUES ET ELECTROCHIMIQUES -

-1-5-1 - Influence des hétérogénéités de structure -

D'une manière générale, l'hétérogénéité diminue l'endurance des matériaux. Les défauts tels que retassures, criques inclusions conduisent à des concentrations de contraintes locales qui facilitent l'amorce de fissures de fatigue.

a) Influence des fibres

Le forgeage et le laminage ont pour effet de donner au métal une texture fibreuse par suite de l'orientation des dendrites dans le sens de l'écoulement du métal. Si partant d'un lingot, on étire une barre par forgeage, les caractéristiques mécaniques (allongement de rupture et résilience) ont leur valeur maximale en long, c'est-à-dire, dans le sens de la barre. En travers, soit perpendiculairement au sens des fibres, les caractéristiques mécaniques peuvent être inférieures à celles que possède le métal coulé qui n'a pas d'orientation sensible.

Le traitement thermique permettant la diffusion des éléments apporte une certaine homogénéité, mais les inclusions non métalliques marquent le travers d'une façon irrémédiable. Pour les alliages légers on trouve une limite d'endurance plus élevée de 20 % pour les éprouvettes taillées dans le sens des fibres que pour celles taillées obliquement.

b) Influence des inclusions

En flexion ou en torsion les ruptures de fatigue s'amorcent généralement sur une inclusion superficielle. On observe également que les inclusions sous-jacentes à la surface amorcent plus fréquemment les fissures de fatigue que celles visibles à la surface. Ce qui fait rechercher la pureté des coulées mécaniques.

-1-5-2 - Nature des fissures de corrosion par fatigue -

Bien que ce chapitre, n'entre pas dans le cadre de notre étude, nous tenons toutefois à signaler la possibilité de corrosion par fatigue. Ceci implique une plus grande détérioration du matériau par l'action conjointe de contraintes cycliques et d'attaque d'un milieu corrosif que celle qui proviendrait par l'action séparée de ces deux phénomènes. Les fissures de corrosion par fatigue sont généralement transgranulaires ou intergranulaires. On peut signaler également l'influence de la température et du flux salivaire sur la corrosion.

-2 - ETUDE DES METAUX UTILISES POUR LA REALISATION DES CROCHETS DES APPAREILS DENTAIRES -

-2-1- APPAREILLAGE -

-2-1-1- Micromachine pour essais de torsion alternée à enregistrement photographique.

But : Imposer à une éprouvette des torsions alternées d'amplitude de fréquence donnée, et pouvoir enregistrer le diagramme couple-torsion. De cette manière on mesure le nombre d'alternances avant la rupture.

La torsion est imposée par un système bielle-manivelle. Le couple créé est repéré par la torsion d'un barreau dynamométrique. L'arbre mû par un moteur oscille à raison de 25 cycles/seconde et un compteur totalise le nombre d'alternances. Un moteur auxiliaire asynchrone de 1/2 t/mn sert à enregistrer optiquement les cycles "couple-torsion" à des intervalles réguliers.

Nous déterminons ainsi la limite de fatigue d'un métal, le frottement intérieur et caractérisons le progrès de la fatigue.

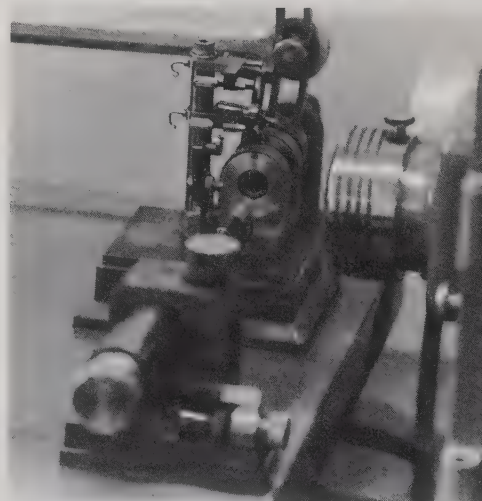
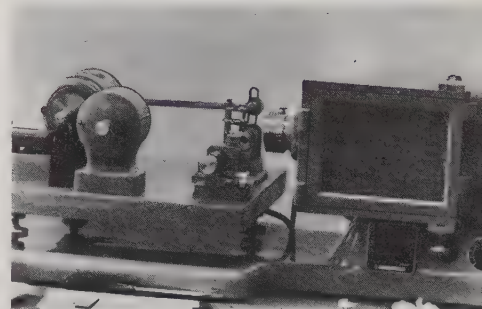
Sensibilité : "élongation" 10^6 dynes-cm sur l'axe des couples :
0,01 radian sur l'axe des cycles de torsion
normale : 15 mm - 10 mm
forte : 125 mm - 20 mm.

Etalonnage : Pour graduer l'axe des couples, on dispose des masses connues P à l'extrémité du couteau qui se situe à l'extrémité du bras a et pour construire l'échelle des torsions on fait dévier l'arbre A d'angles connus au moyen de la vis micrométrique V et d'un levier de bras r.

Enregistrement : Nous utilisons un trépied optique. Des bras b 1 et b 2 fixés aux deux mors T1 et T2 attaquent le trépied optique T2, maintenu en place par un léger ressort.

La pointe de l'angle droit p2 accompagne la torsion du barreau D et p1 suit la déviation de l'arbre A. Les mouvements angulaires étant petits, il est aisé de voir la courbe décrite par le point lumineux. L'image S' a pour coordonnées le couple C et la torsion α de la microépreuve.

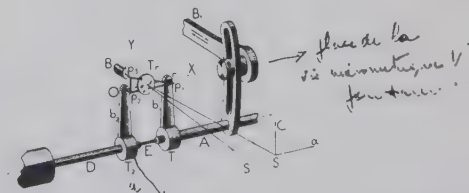
Les courbes peuvent être enregistrées photographiquement. Le mode d'emploi n'est évidemment pas le même si l'on mesure seulement la limite de fatigue. On écarte alors le trépied optique. Une amplitude est choisie à laquelle correspond un taux de contrainte de cisaillement. Le moteur synchrone est lancé jusqu'à la rupture de l'éprouvette et on note sur le compteur le nombre d'alternances.



vue de la partie de la machine travaillant en torsion

Description de la machine.

- B₁ bielle entraînée par un excentrique
- A arbre oscillant
- D barreau dynamométrique
- E microépreuve
- T₁ et T₂ mors
- b₁ et b₂ bras fixés aux mors et entraînant le trépied optique T_r
- T_r trépied optique avec miroir
- p₁ pointe du trépied accompagnant la torsion de l'arbre A
- p₂ pointe du trépied accompagnant la torsion du barreau D
- p₃ pointe fixe sur la base B



Puis d'autres éprouvettes sont essayées sur d'autres contraintes et on porte sur un diagramme semi-logarithmique le nombre N en fonction de la contrainte. Cette phase permet ainsi d'obtenir une courbe de Woëhler.

-2-1-2 - Microscope électronique à balayage -

(Service du professeur UZAN- Faculté des Sciences de LYON).

Pouvoir de résolution 150 à 300 = en mode émissif.

Profondeur de champ 300 fois supérieur à celle d'un microscope optique.

Gammes de grossissement à 0 mm = 40 à 200.000 fois.

à 11mm = 20 à 100.000 fois.

à 20mm = 14 à 70.000 fois.

grossissements utiles entre 20.000 et 50.000.

Chambre d'échantillons dimensions intérieures Ø 230 mm

H = 120 mm deux fenêtres à diamètre de 127 mm.

Dimensions d'échantillons : jusqu'à un diamètre de 12 mm et 3 mm d'épaisseur.

Déplacement de l'échantillon : 90° en rotation autour d'un axe perpendiculaire à la sonde.

16 mm linéaire dans le sens X

13 mm linéaire dans le sens Y

10 mm linéaire dans le sens Z.

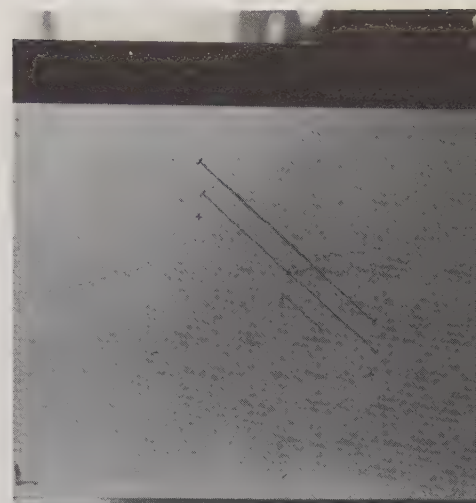
Ce microscope détecte et transmet les images recueillies par une sonde électronique ultra-fine balayant la surface d'un échantillon. L'image est observée sur un écran cathodique. Il comporte trois lentilles électro-magnétiques de condensateurs préalablement alignées concentrant le faisceau d'un canon électronique à triode classique en une sonde fine. Les bobines à balayage animant celle-ci à la surface de l'échantillon pour l'exploration de l'image sont montées dans l'alésage de l'objectif frontal.

Le grossissement se modifie en agissant sur la longueur de la ligne balayée sur l'échantillon, celle balayée sur les tubes cathodiques demeurent constante. Dans le mode émissif qui donne un contraste topographique des électrons secondaires de faible énergie (émis en surface par excitations primaires de la sonde électronique) sont entraînés suivant des trajectoires ordinairement incurvées vers un système comprenant un scintillateur polarisé positivement, un conduit lumineux et un photomultiplicateur collecteur.

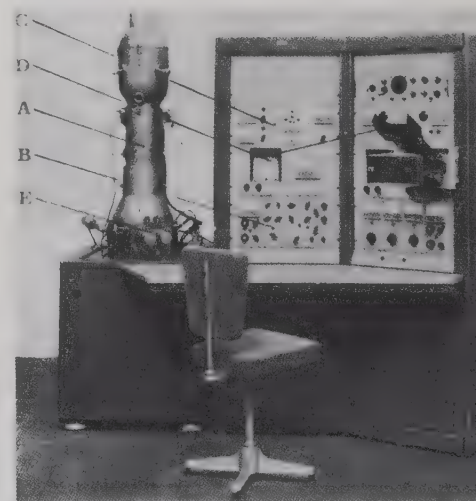
Après amplification, ce signal module directement le faisceau du tube cathodique.

Le vide est obtenu dans la colonne pendant le changement d'échantillon, le vide relatif maximum étant établi en quelques minutes.

Ecran permettant de suivre les courbes.



Type de courbe sans frottement interne apparent enregistré sur la plaque de la machine lors du déplacement du point lumineux correspondant à la vitesse du moteur asynchrone d'un tour minute.



Microscope électronique à balayage

A = dispositifs électroniques et de balayage

B = réglage du grossissement

C = profondeur du champ

D = tubes cathodiques et chambres photographiques

E = dispositions relatives à l'échantillon

- Comparaison entre deux sortes de microscopes électroniques-

a) le microscope conventionnel électronique donne une meilleure résolution et une analyse plus fine de l'influence des défauts de structure.

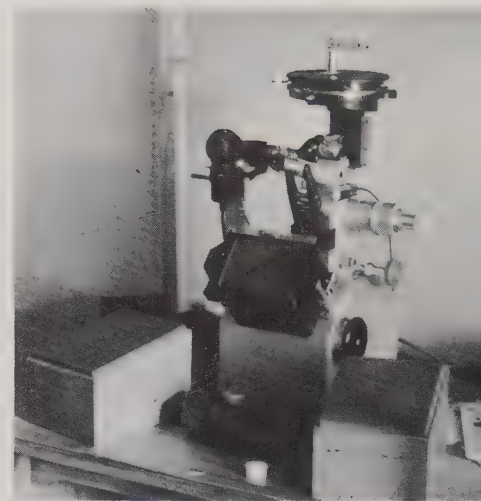
b) le microscope électronique à balayage donne une commodité d'emploi, une adaptation de l'étude des faciés et de l'origine des ruptures par une plus grande profondeur des champs, un outil de choix pour l'analyse de la morphologie des ruptures directement, rapidement, globalement et sous de multiples orientations.

- Autres moyens optiques utilisés -

Loupe binoculaire à grossissement de 40 par vision stéréoscopique de l'objet dans le champ visuel étendu.

Un microscope métallographique à chambre photographique.

Comparaison entre deux microphotographies obtenues l'une par microscope métallographique et l'autre par microscope électronique à balayage.



Echantillon A Chrome-Cobalt

Microscope métallographique

g x 8 x 4



Microscope à balayage électronique g x 36



-2-1-3 - Technique de polissage des éprouvettes -

a) polissage mécanique normal

Enrobage des éprouvettes à froid dans une résine acrylique par pressage.

Temps de polymérisation 30 mn environ.

Puis polissage au papier émeri passant de 200 jusqu'au 600 avec lubrification constante à l'eau.

On passe d'une bande à l'autre en croisant la surface d'attaque afin de supprimer les rayures du polissage précédent.

Polissage terminal à l'alumine 1 heure suivi d'un nettoyage à l'eau distillée et séché à l'air chaud.

b) attaque des chrome-cobalt et nickel-chrome pour révéler les carbures, par le réactif de MURAKANI, dont la composition est la suivante :

Ferricyanure de potassium	$\text{Fe CN}^6 \text{K}^3$	= 10 gr.
Soude caustique	K O H	= 10gr.
Eau	$\text{H}^2 \text{O}$	= 100 cm ³ .

à employer frais et laisser l'éprouvette 5 minutes à ébullition.

c) polissage par frottement électrolytique

technique mise au point au Japon par NAGAI en 1951 et théorie reprise par REINACHER.

L'enrobage des éprouvettes est réalisé avec une mise en place d'une électrode en contact avec l'éprouvette et traversant la masse de matière plastique. Afin de pouvoir relier cette éprouvette au pôle + du groupe d'alimentation, pré-polissage jusqu'au papier émeri n° 600 puis à l'alumine 1 heure et enfin mise en place dans l'appareil qui comprend une plaque recouverte d'un drap mou et épais pour les matériaux mous et d'un drap dur et mince pour les matériaux durs. Cette plaque mue par un mouvement rotatif de 125 t/mn est reliée à la borne négative de l'alimentation.

L'éprouvette reliée à la borne positive appliquée sur le drap subit un polissage mécanique et est attaquée par l'électrolyte suivant la valeur de l'intensité du courant, on peut obtenir soit uniquement un polissage, soit un polissage et une attaque révélant essentiellement les joints de grains.

Ce polissage permet un poli spéculaire et on applique la technique suivante pour l'or :

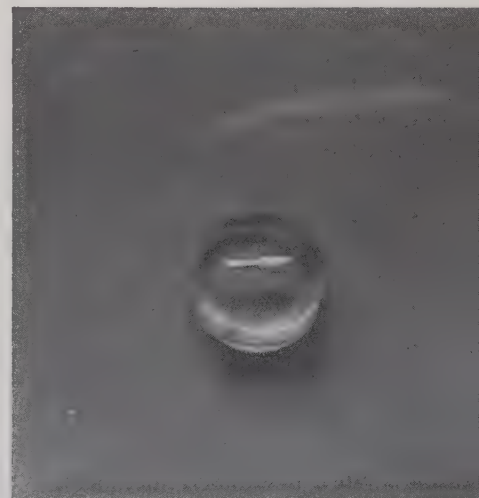
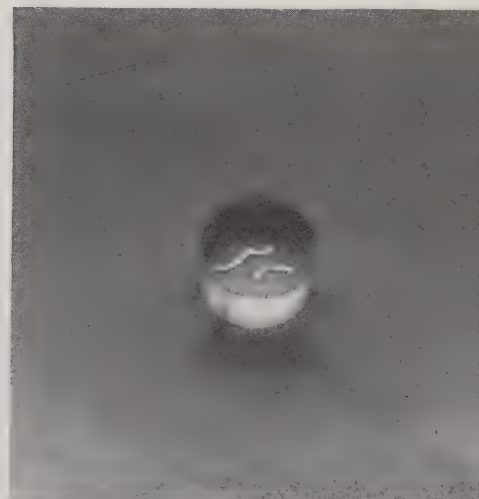
Electrolyte RP3 + Alumine

Drap à polir RC 2 ou RC 3

Courant 80 à 100 m A.

Durée du polissage : 4 minutes pour polir

30 secondes pour attaque.



-2-2 - MATERIAUX & TECHNIQUES UTILISES POUR LA REALISATION DES EPROUVETTES -

-2-2-1 - Métaux utilisés -

Chrome-Cobalt = Echantillons A et Echantillons B.

Nickel-Chrome = Echantillons C.

OR = Echantillons D₀ Echantillons E.

D₁

D₂

-2-2-2 - Revêtements pour la coulée -

pour les Chrome-Cobalt et Nickel-Chrome.

Revêtement du commerce expansion avant chauffage 80%.

dilatation : 2,3 %

retrait : 2,14 %

précision : 0,016 mm.

pour les ORS

Revêtement du commerce

Dilatation en 2H 0,35 à 0,50 %.

Dilatation dans H₂O 1,5 à 3 %.

Dilatation thermique à 800° 1,2 à 1,4 %.

-2-2-3 - Technique de coulée -

Eprouvette en cire rose

Chauffe du cylindre Ni-Cr et Cr-Co 870° équilibré pendant 1 nuit au four.

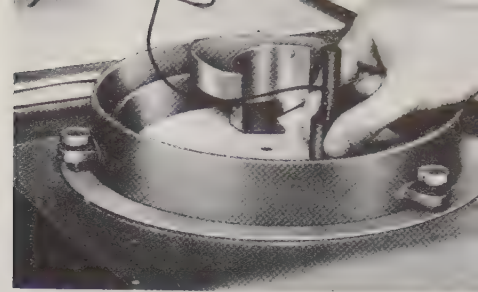
pour les Ors à 460°.

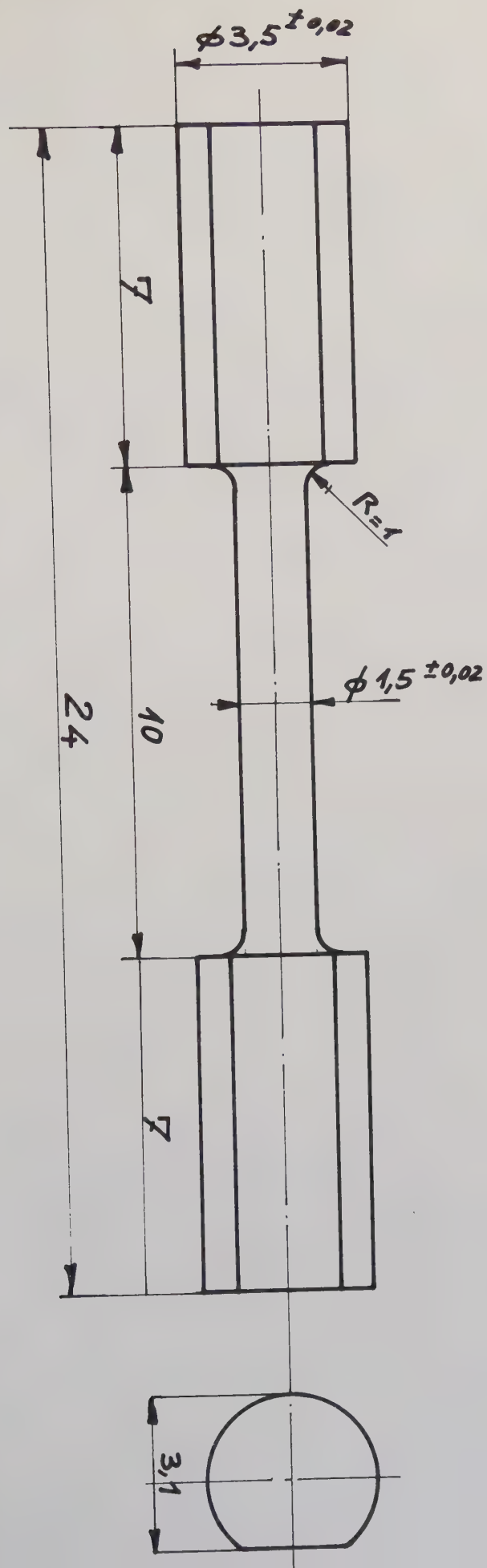
Coulée à la cire perdue à la fronde automatique pour Cr-Co et Ni-Cr avec un arc électrique

pour les Ors avec chalumeau Oxygène.

Refroidissement à l'air jusqu'à 400° avant démoulage

Agrandissement des éprouvettes cylindriques réalisées en cire rose et placées dans le cylindre en vue de la coulée. Arrivée du métal à une extrémité et points chauds plus évents à l'autre extrémité. Cette technique permet d'éviter la flèche de l'éprouvette en cire au moment de la mise en revêtement et une densité plus homogène du métal au centre de l'éprouvette.





Propriétés	<u>Chrôme-Cobalt</u>		<u>Nickel-Chrôme</u>	<u>Ors</u>	
Echantillons	A	B	C	D ₀ D ₁ D ₂	E
Point de fusion	1640°	871°	1353°	956°	920°
Résistance à la traction	78 kg/cm ²		55 kg/cm ²	56 kg/cm ²	52 kg/cm ² 79 kg/cm ²
Limite d'élasticité	5067 B.		2150 Bars	3400 bars 7000 bars revenu	3500 bars 6800 bars revenu
Dureté	25 à 30 Rockwell C		90 Rockwell B	160 Brinell 277 Brinell revenu	135 Brinell 214 Brinell traité
Densité	8,23		8,10	15	15
Allongement à la rupture	12 %		20 à 30 %	16 % 31 %	1,9 traité 4% recuit
Composition	cr = 26 co = 50,42 ni = 14,70 c = 0,35 mn=0,54 fe = 0,25 mo=5,60 w = 0,90 s = 0,011 p = 0,03	cr =25 co =37,50 ni =37,50	cr = 22 ni = 65 c = 0,05 si = 2,30 mn=0,80 fe = 10 b = 0,30	Au=680 ag=100 cu=140 pt= 50 pd= 30	Au 750 ag = 100 cu = 100 - pt = 30 - zn = 10 -

-2-2-5 - Préparation de l'éprouvette à partir du cylindre
brut de fonderie -

- 1) Décolletage au tour - tour outil avec acier rapide.
- 2) Rectification à l'aide d'une rectifieuse universelle.

Emploi d'une meule 406 x 50 x 127 en corindon supérieur rose dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Mélange de grains : 54/70.
- Dureté L
- Structure moyenne 7
- Vitrifié K.E.

- 3) Fraisage des méplats sur les têtes de l'éprouvette avec fraise en acier rapide.

La forme de l'éprouvette ainsi usinée présente deux congés ressemblant à la liaison d'un bras de crochet à la plaque base métallique. La longueur de la partie rétrécie de l'éprouvette mesure 1cm de longueur soit la longueur moyenne d'un bras de crochet. Cette forme a l'avantage de répartir les charges. La technique de coulée employée a été exactement semblable à celle employée dans nos laboratoires dentaires.

-2-3 - DESCRIPTION DES EXPERIENCES -

Les éprouvettes coulées par la méthode de la cire perdue et rectifiées ont présenté certaines difficultés dans leur réalisation pour obtenir des maquettes en cire parfaitement rectilignes. On a pu obtenir pour les Cr-Co et les Ni-Cr des maquettes assez bonnes par notre prothésiste. Pour les éprouvettes en Or préparées directement par le fabricant elles sont sorties de la première coulée avec une flèche trop importante pour être rectifiées directement. Nous les avons redressées et nous leur avons fait subir un traitement thermique de recuit pour faire disparaître les effets d'écrouissage. Celles-ci ont été divisées en deux groupes : l'un comportant des éprouvettes recuites, l'autre comportant des éprouvettes en traitement thermique de revenu. Nous avons procédé à une dernière coulée d'éprouvettes en or que nous avons utilisées pour nos essais sans aucun traitement thermique. Toutes les éprouvettes ont été rectifiées par le même ouvrier et nous avons constaté très peu d'écarts entre les éprouvettes-étalons et celles obtenues. Par exemple l'éprouvette étalon Ø de la tête 3,501 mm.

Ø du corps 1,520 mm.

Longueur : 24 mm.

Eprouvette rectifiée :

Ø tête 3,502 mm à 3 mm 504.

Ø corps 1 mm 511.

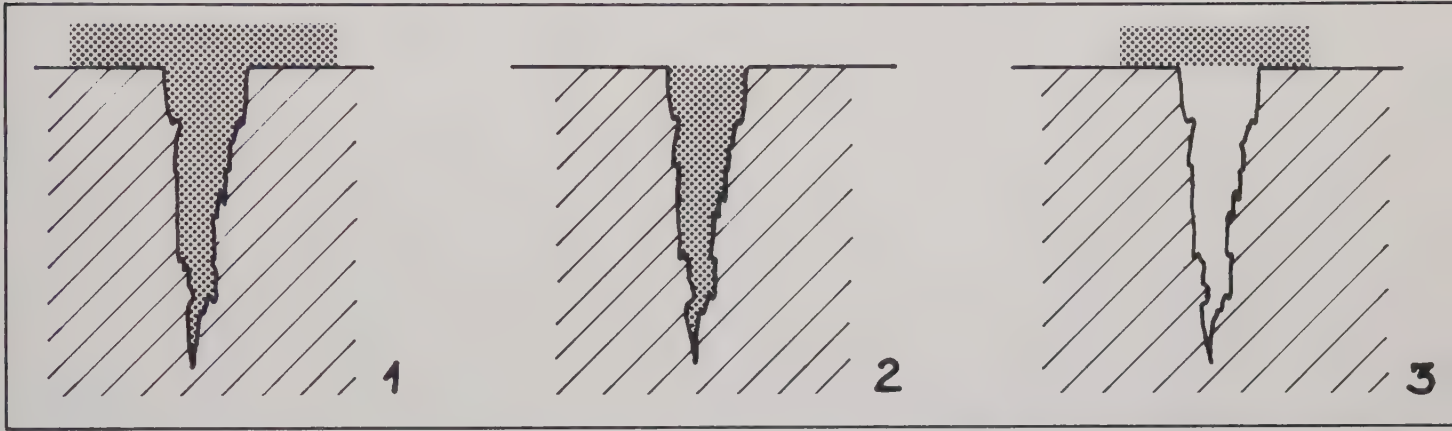
Longueur : 24 mm 07.

Les écarts très faibles sont négligeables et prouvent le bon usinage.

-2-3-1 - Manipulations préliminaires -

Toutes les éprouvettes ont été analysées à la loupe binoculaire avec un grossissement de 40 pour étudier l'état de surface de celles-ci.

De nombreuses retassures ont été constatées et ainsi que le montre "CAZAUD" ces trous peuvent être souvent l'amorce de ruptures. A la suite de cette constatation on a procédé à une étude systématique par la méthode du ressuage de la surface de toutes les éprouvettes.



-2-3-2 - Ressuage -

C'est une méthode de révélation des fissures et des défauts de surface dans tous les métaux. On applique à cet effet un produit rouge organol qui a un pouvoir pénétrant sur une surface métallique préalablement dégraissée aux ultra-sons.

Cette pénétration dure environ 10 mn, on rince à l'eau et on sèche à l'alcool très soigneusement. On applique ensuite un révélateur par vaporisation en couches minces sur la surface métallique.

Cette technique permet de déceler les défauts microscopiques sans endommager la pièce, (criques, fissures porosités) et elle est utilisée pour tous les métaux poreux.

Après le temps de pénétration, les fissures apparaissent par ressuage en rouge à travers le produit révélateur. Ces traces rouges indiquent l'emplacement des défauts. La rapidité d'apparition, leur taille, leur forme donnent des indications sur la nature des discontinuités qu'elles permettent de repérer.

Vitesse d'apparition = largeur et profondeur du défaut.

L'étendue finale = volume de la fissure (points très rapprochés)

Points dispersés montrent une faible porosité.

Criques = 3 ou 4 points très rapprochés et alignés.



Partie foncée ponctuelle montrant l'apparition du rouge et montrant la présence d'une porosité.

-2-3-3 - Essais sur Machine à torsion alternée -

Après avoir repéré sur le verre dépoli le point d'amplitude et de contrainte nulle, on enregistre le premier cycle sur papier millimétré et sur plaque photographique. On procède à un nouvel enregistrement quand on observe une variation dans la forme du cycle. On arrête l'essai à 5×10^6 cycles s'il n'y a pas rupture avant (le nombre de cycles correspond à peu près à 10 ans d'utilisation en bouche).

-2-3-4 - Etude du facies des fractures -

Photographies au microscope métallographique ou microfractographies au microscope à balayage.

-2-3-5 - Observation de la microstructure des alliages étudiés -

-2-4 - RESULTATS -

-2-4-1 - Alliages chrome-cobalt -

-2-4-1-1 - Tableau des résultats.

-2-4-1-2 - Courbes de Woehler.

-2-4-1-3 - Micrographie de structure.

-2-4-1-4 - Microfractographies prises au microscope électronique à balayage.

-2-4-1-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.

-2-4-2 - Alliages nickel-chrome -

-2-4-2-1 - Tableau des résultats.

-2-4-2-2 - Courbes de Woehler.

-2-4-2-3 - Micrographie de structure.

-2-4-2-4 - Microfractographies prises au microscope électronique à balayage.

-2-4-2-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.

-2-4-3 - Alliages d'ors -

-2-4-3-1 - Tableau des résultats.

-2-4-3-2 - Courbes de Woehler.

-2-4-3-3 - Micrographie de structure.

-2-4-3-4 - Microfractographies prises au microscope électronique à balayage.

-2-4-3-5 - Variation de la forme de la courbe du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles.

ALLIAGES CHROME - COBALT

=====

CR - CO

Echantillons N°	Nombre Cycles rupture	N - cm	Rd 10 ⁻³	K Pente de la courbe
101	153.700	23	51,5	0,44
2	essai de traction - rupture avec zone d'arrachement			
3	2.000			Photo
4	1.000	25	43,7	0,52
5	éprouvette tordue au début de l'expérience			courbe torsion déformation
6	34.500	10,3	20,30	0,51
7	273.300	19,8	33,50	0,58
8	essai de torsion			
9	500	61,5	28	0,17
110	1.531.000	3,1	7,2	0,44
10 bis	36.000	24,8	12,35	2
11	700.000	7,1	17,6	0,40 photo
121	5.386.300	9	18	0,50 non rompue
22	106.300	8,29	18,1	0,45
25		9,4	13,25	0,71
	étude de variation de frottement interne			
27	8.241.000	8,2	18,3	0,44 non rompue
28	33.600	17,1	34	0,50
29	1.356.250	8,7	18,1	0,48
130	173.700	7,1	22,5	0,32 non rompue
401	249.200	6,60	8,20	0,10 photo

..
COURBES de W O E H L E R

=====

g. N.

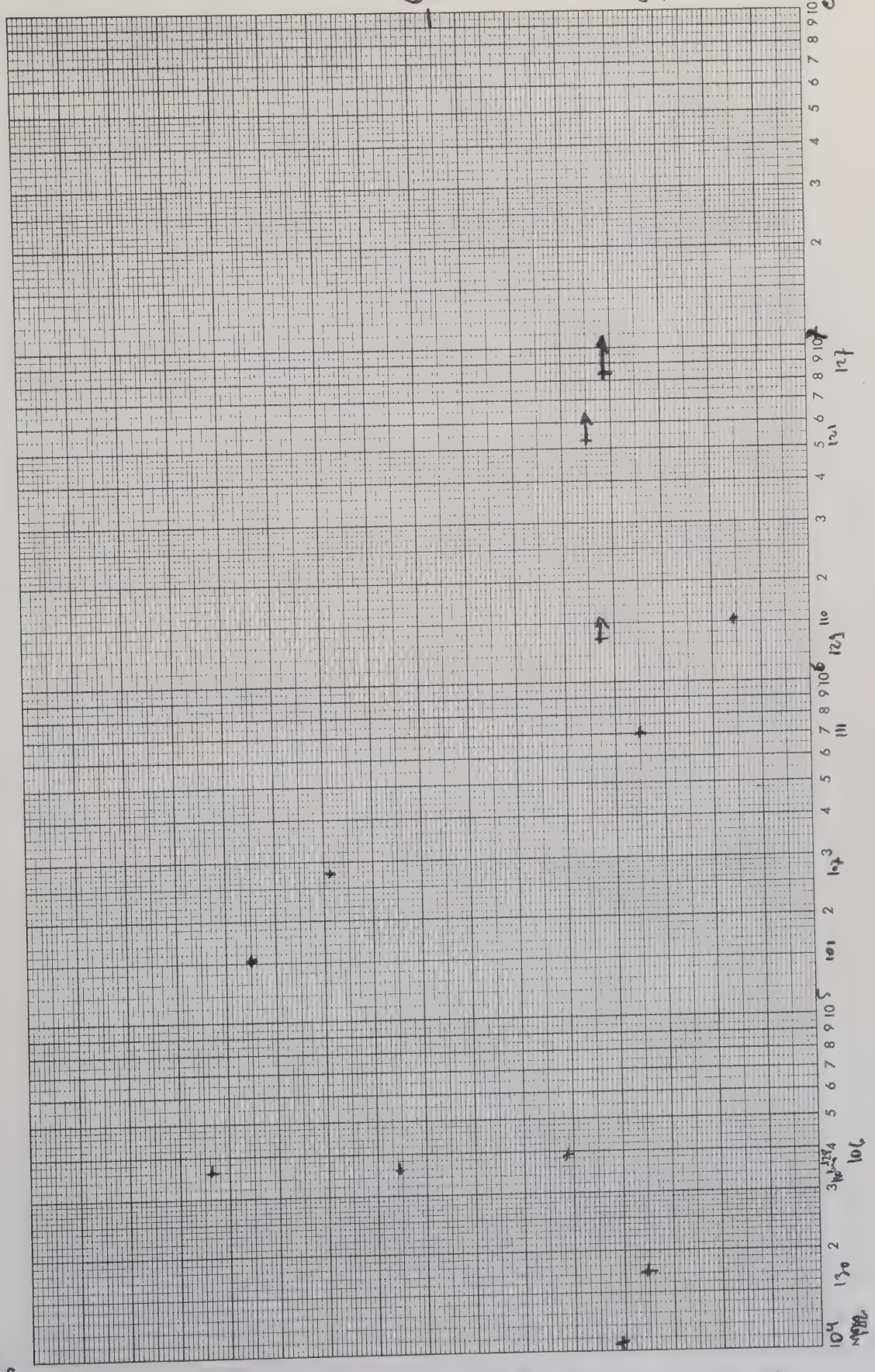
limit
clarique

limit
s'entrouvre

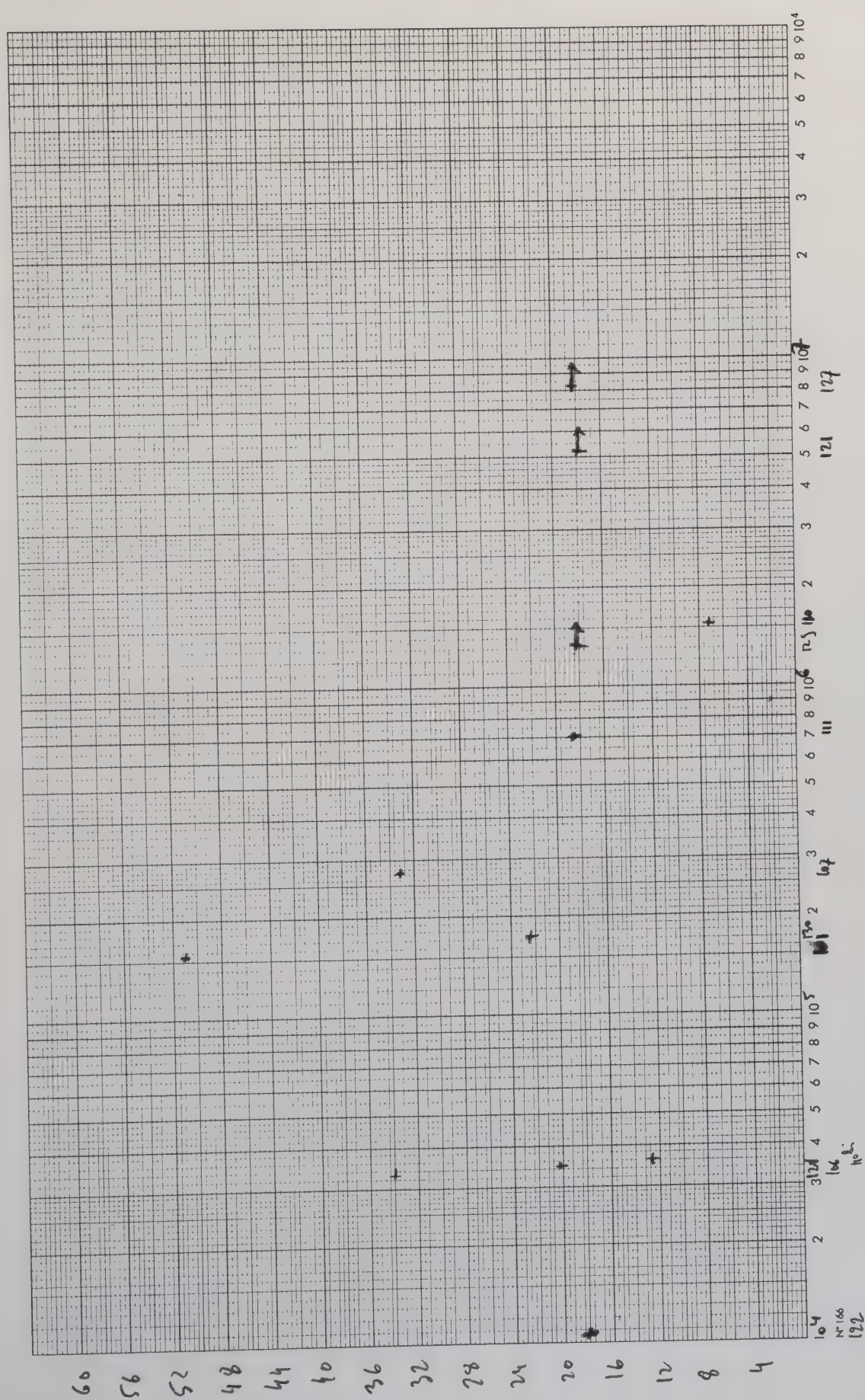
cycles

Centimètres

28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2



no. 100
no. 100



MICROGRAPHIE DE STRUCTURE

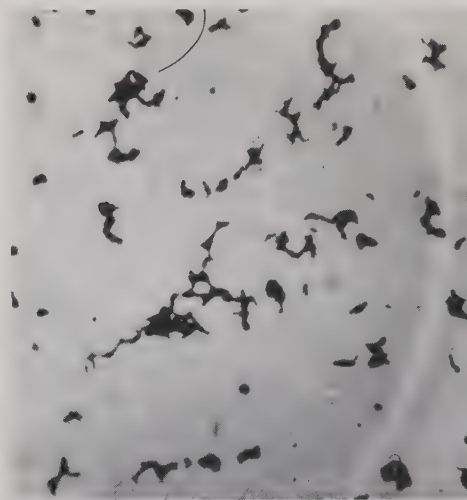
=====

Echantillon A

attaque au Murakani 5'
g x 8 x 1 x 2,2 présence de retassures.



attaque au Murakani 5'
g x 45 x 8 x 1,5 apparition des carbures.



attaque au Murakani 45''
g x 60 révélation des carbures sur éprouvette non fatiguée.



M I C R O F R A C T O G R A P H I E S

prises

AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Echantillon A n° 101
rupture 153.700

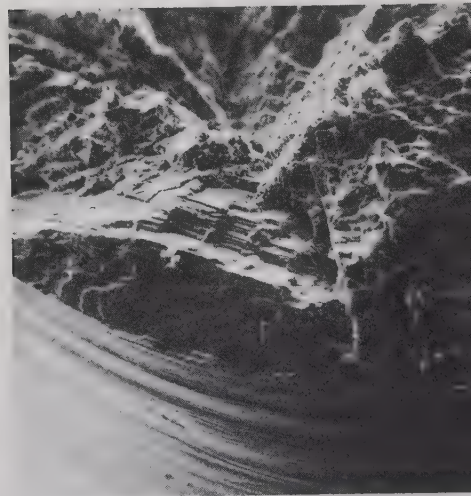
$x = 10,30 \times 10^{-3}$ rd
 $y = 4,6$ N.Cm.

Zone d'arrachement.

g x 50



g x 160



g x 800



g x 48 petite partie lisse en haut à droite

Echantillon A n° 103

rupture à 2.000

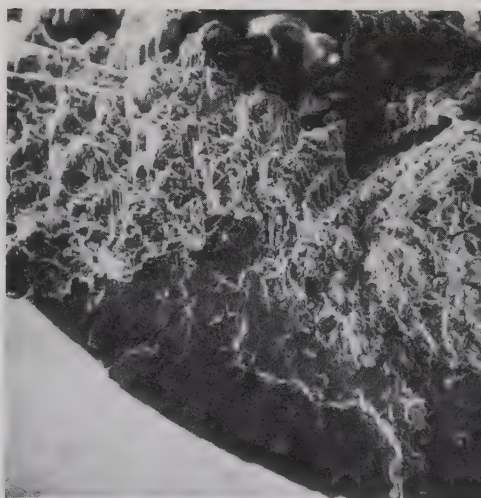
dendrites + zone d'arrachement



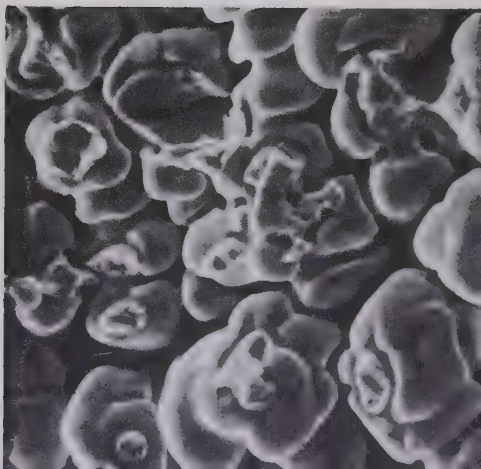
gx170 fracture avec arrachement



gx195 détail de la zone en bas à gauche



gx980 têtes de dendrites



g x 36.

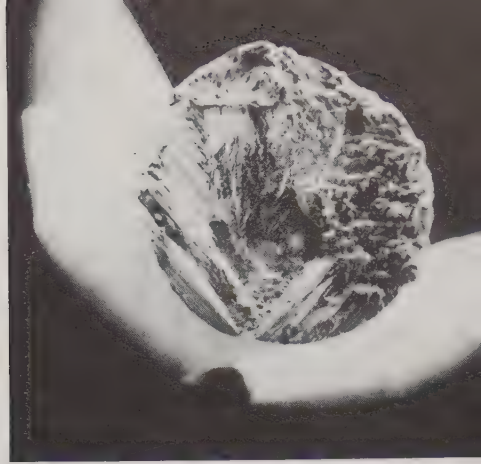
Echantillon A n° 111

sans rupture 700.000 cycles

y = 4,8

x = 5,46.

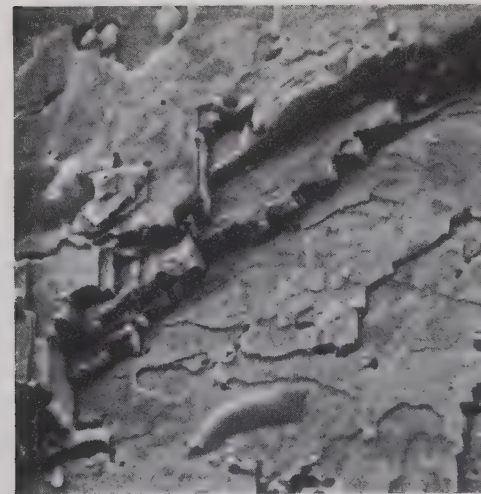
plan de clivage zone creuse dans le V zone d'arrachement.



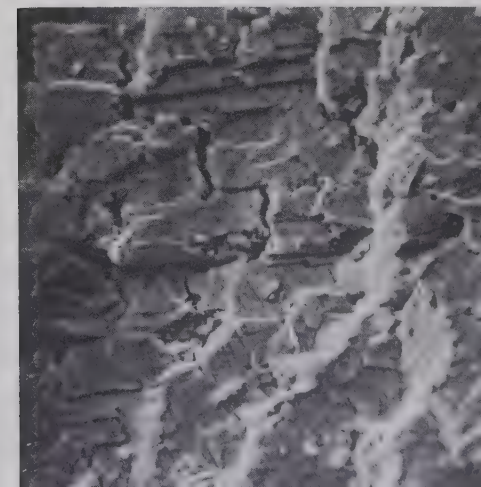
g x 162 plans de clivage



g x 810 les mêmes plans



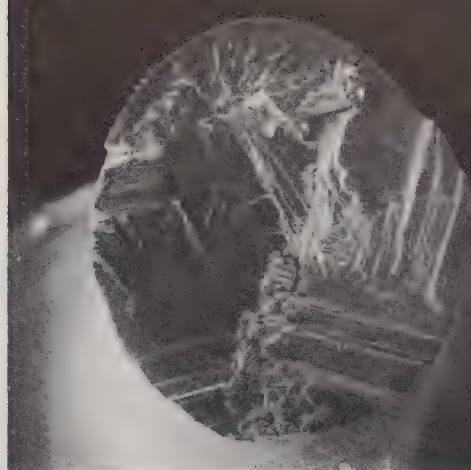
g x 810 arrachement avec partie lisse et fissures



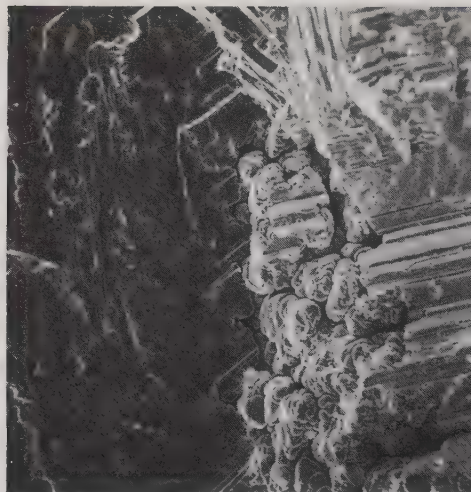
Echantillon B n° 401

rupture 249.200 E = 0,7

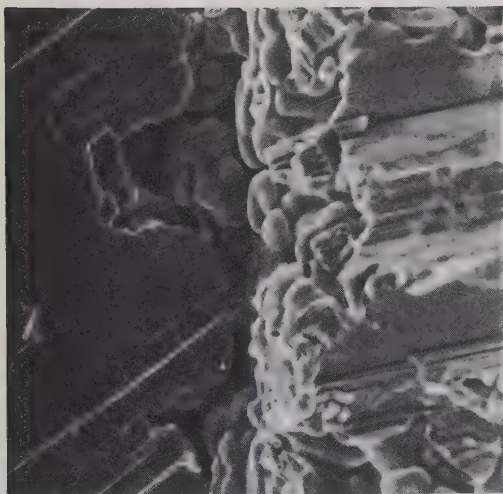
g x 50



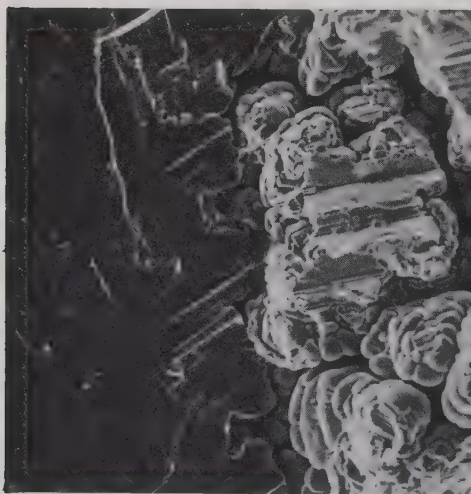
g x 155



g x 780



g x 310



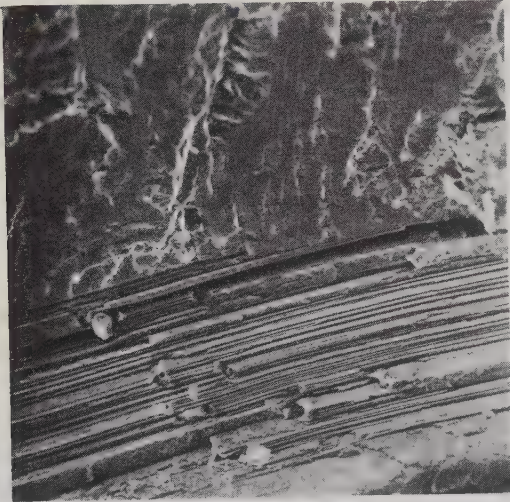
g x 780



g x 158



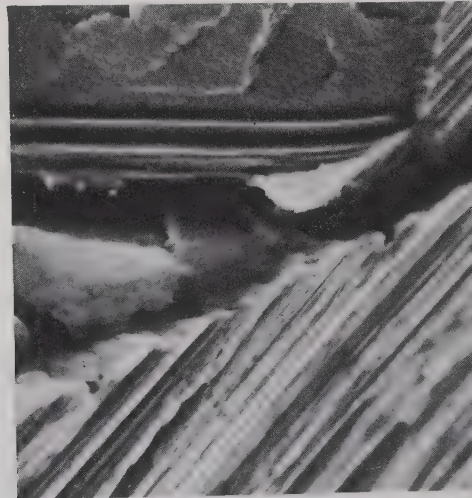
g x 310



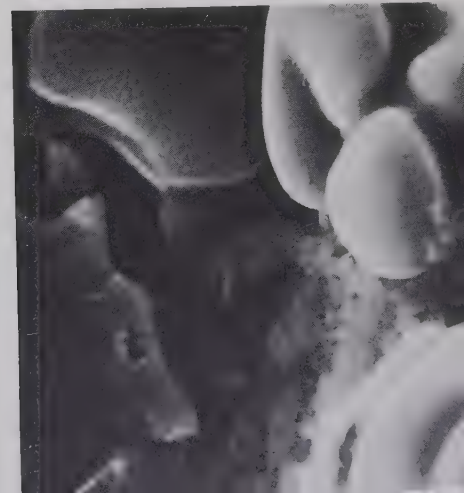
g x 1550



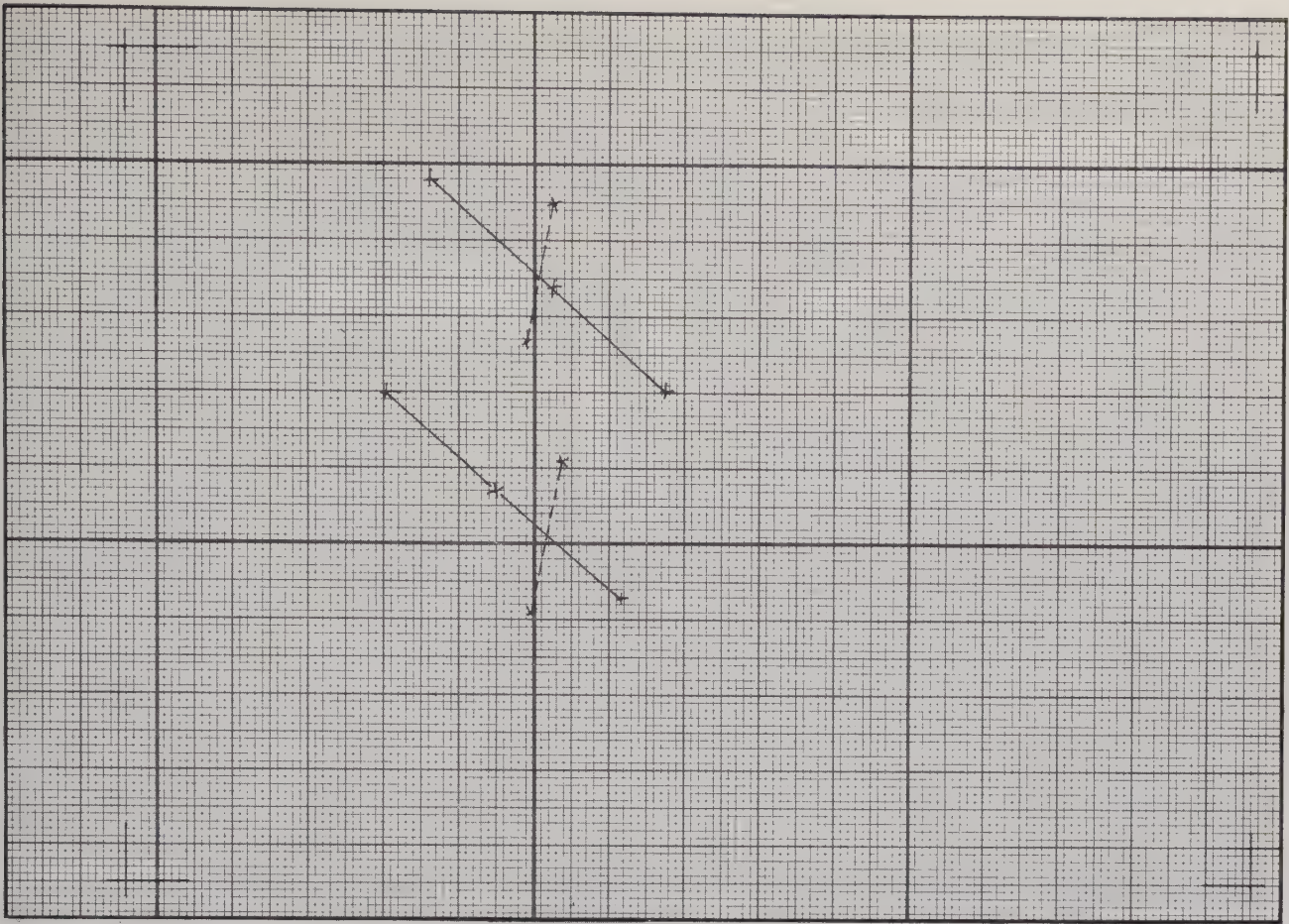
g x 3100



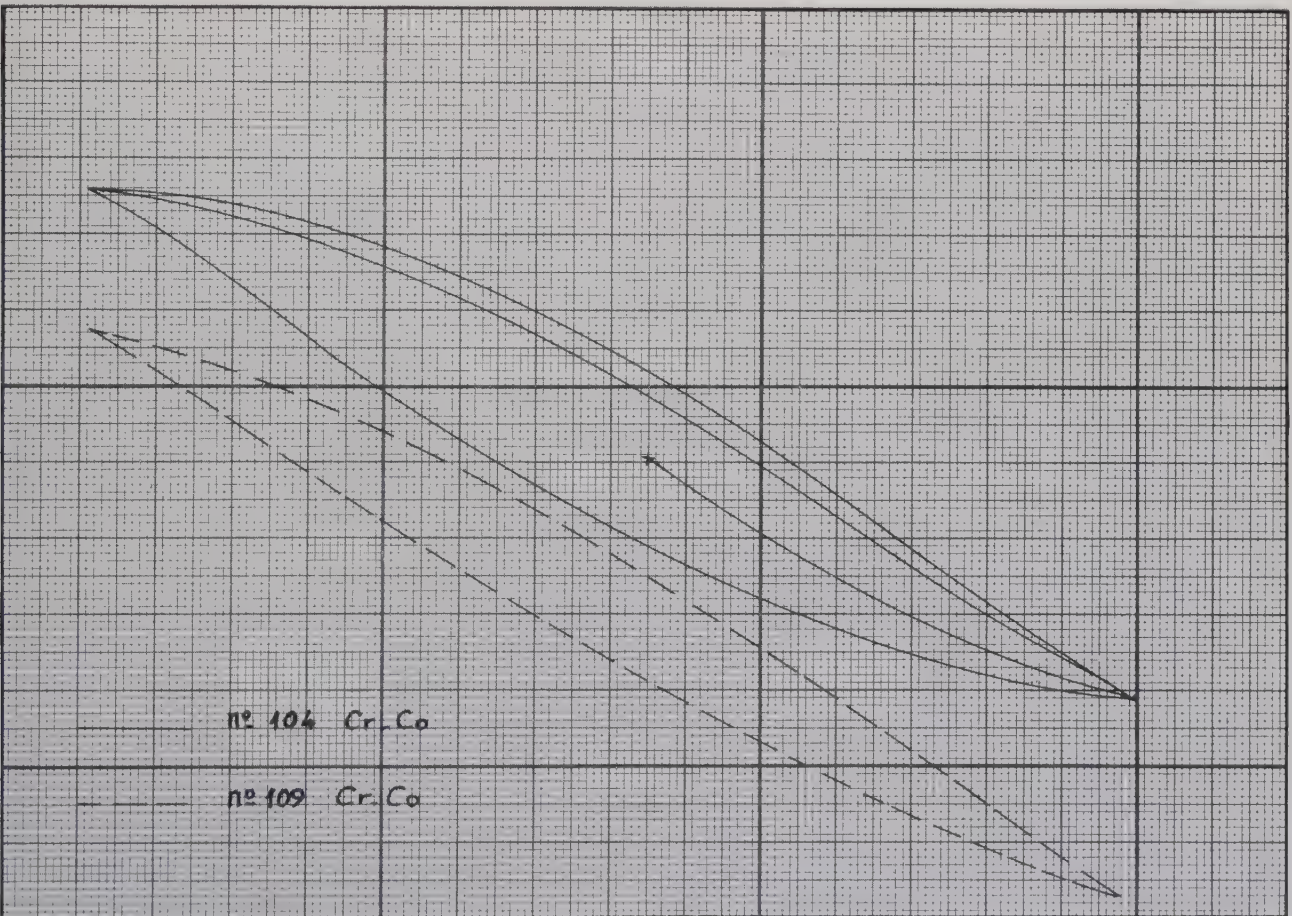
g x 3200

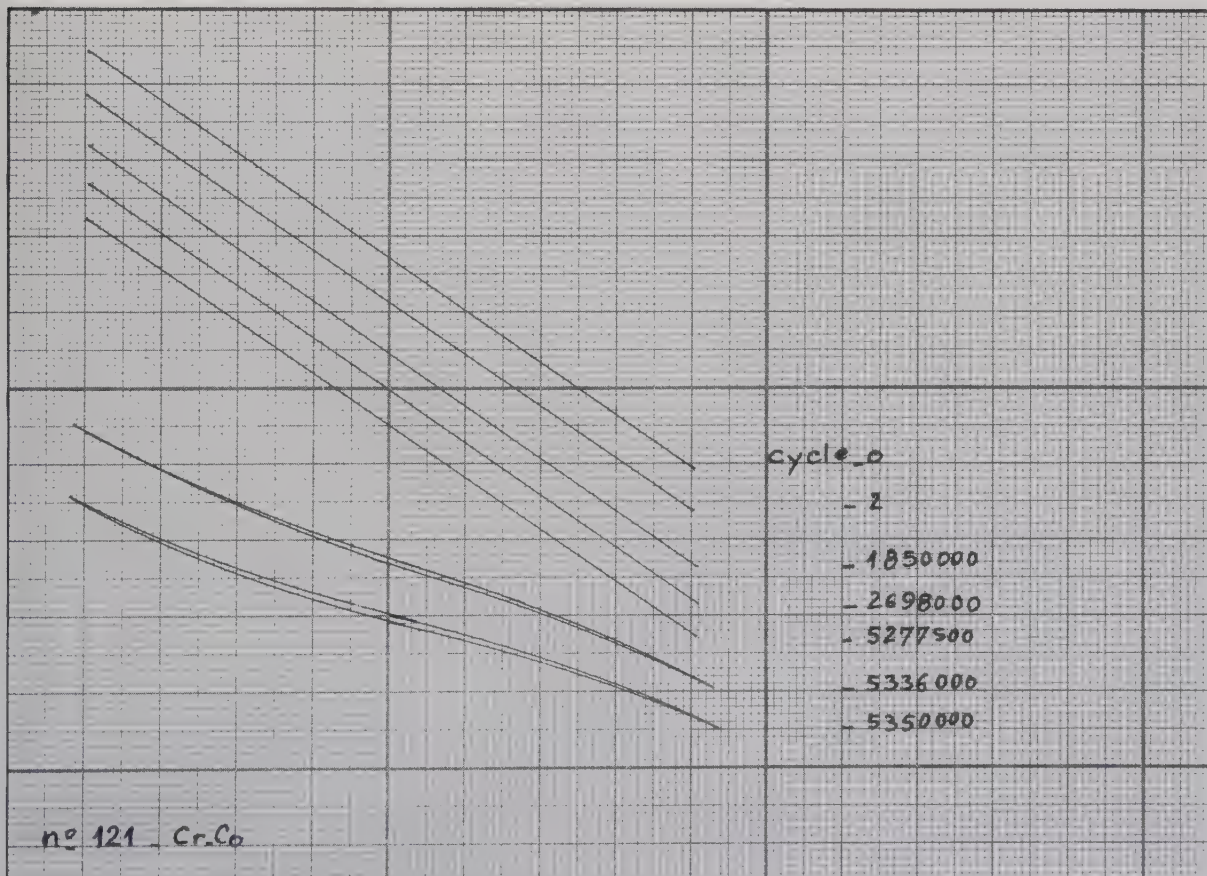
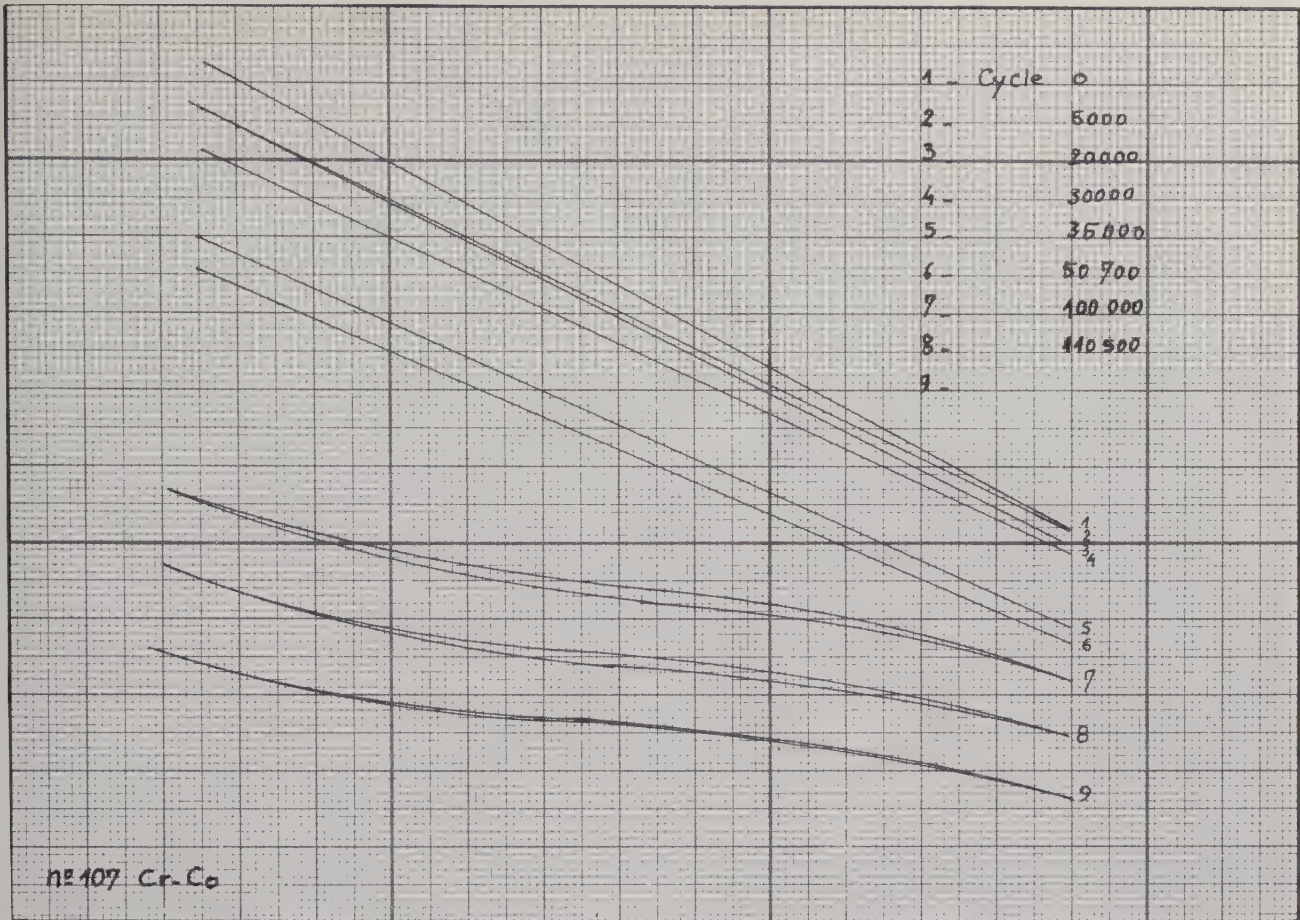


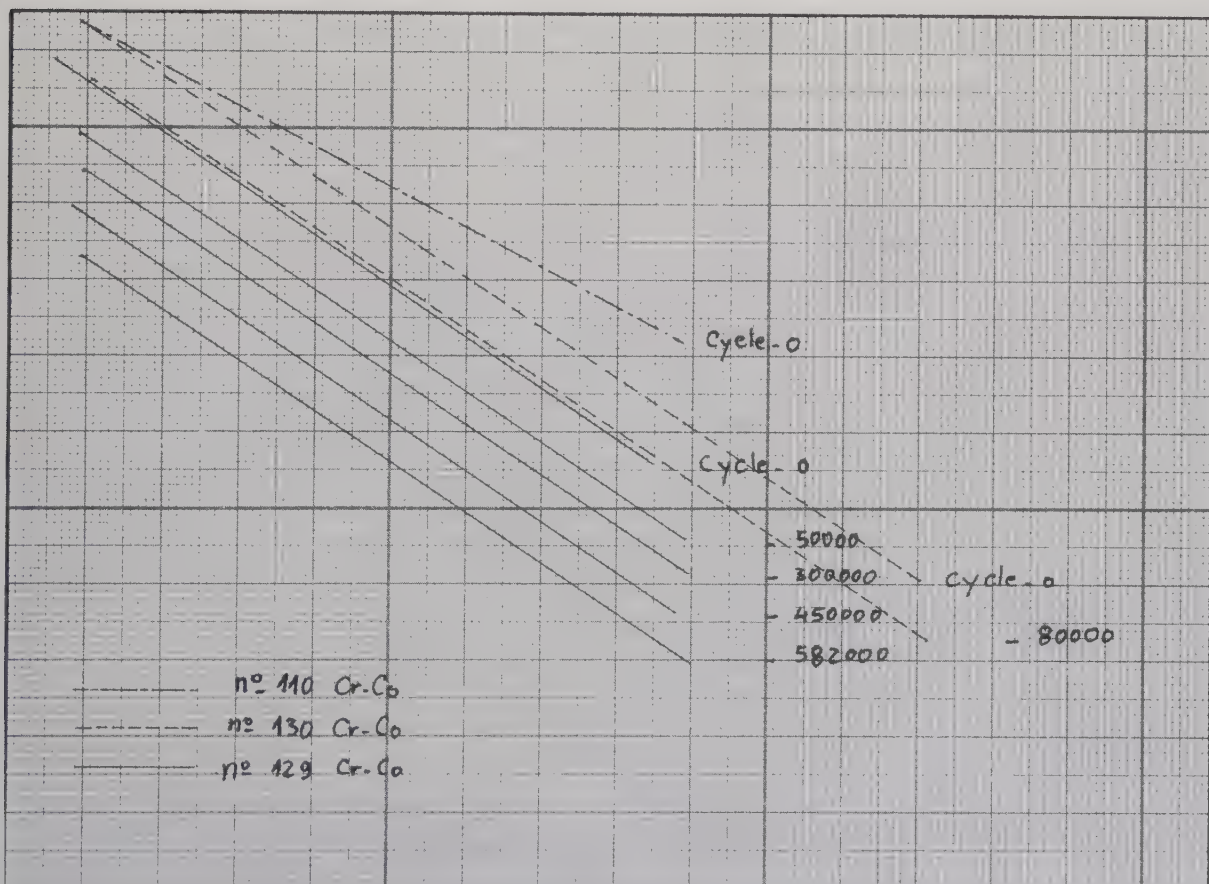
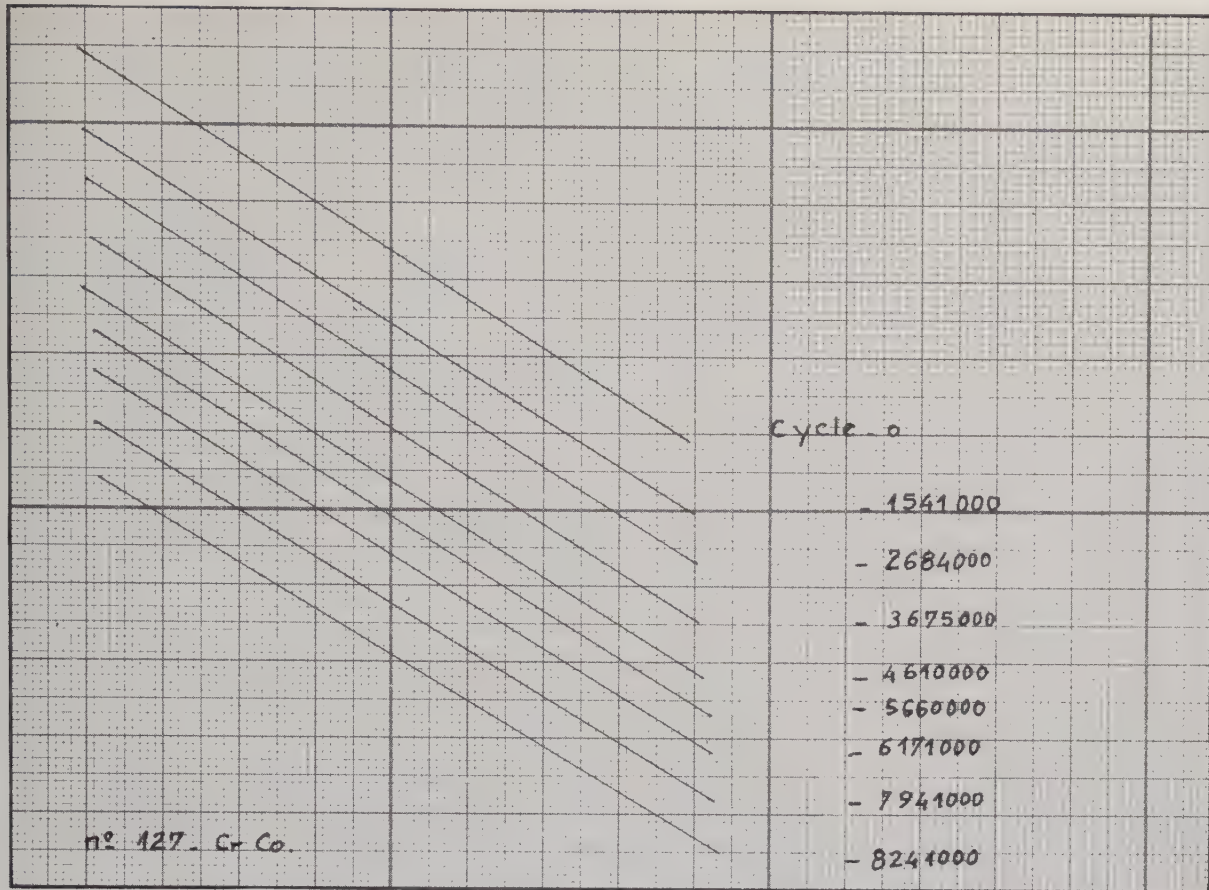
VARIATION de la FORME de la COURBE du CYCLE D'HYSTERESIS
en fonction du Nombre de Cycles



Procédé de repérage du centre des courbes







2-4-1-5 -(suite) -

Limite élastique :

éprouvette n° 125 n'ayant pas subi d'écrouissage

$$\alpha = \frac{132}{22,14} = \frac{59,6}{2} = 28,8 \times 10^{-3} \text{ rd.}$$

ALLIAGES NICKEL - CHROME

chantillons N°	Nombre Cycles rupture	N - cm	Rd 10 ⁻³	K Pente de la courbe
200	192.500	16,15	54,7	0,29
1	4.004.300	7,25	18,1	0,40
2	1.371.000	7,10	18,1	0,39
5	1.400.000	12,25	35,7	0,39
6	tordu par machine-fracture à l'endroit de la courbure			
8	782.000	10,3	25,1	0,41
210	282.000	6,15	50,25	0,12
11	779.100	9,35	25,50	0,36
13	5.813.700	4,5	12,7	0,35
14	101.300	6,6	17,8	0,37
15	3.387.100	8,05	27,25	0,29 non rompue
16	494.200	13,5	35,3	0,38
17	848.200	11,51	36,2	0,32 photo
18	9.000.000	7,1	17,2	0,41 non rompue
19	6.116.200	5	12,9	0,37 non rompue
220	1.289.400	10,1	24,8	0,4
21	essai frottement interne	-		non rompue
22	1.566.900	9,8	25	0,39 photo
23	308.800	12,4	35	0,35
24	3.015.000	7,6	18,1	0,42
25	1.254.000	7,6	25,1	0,30

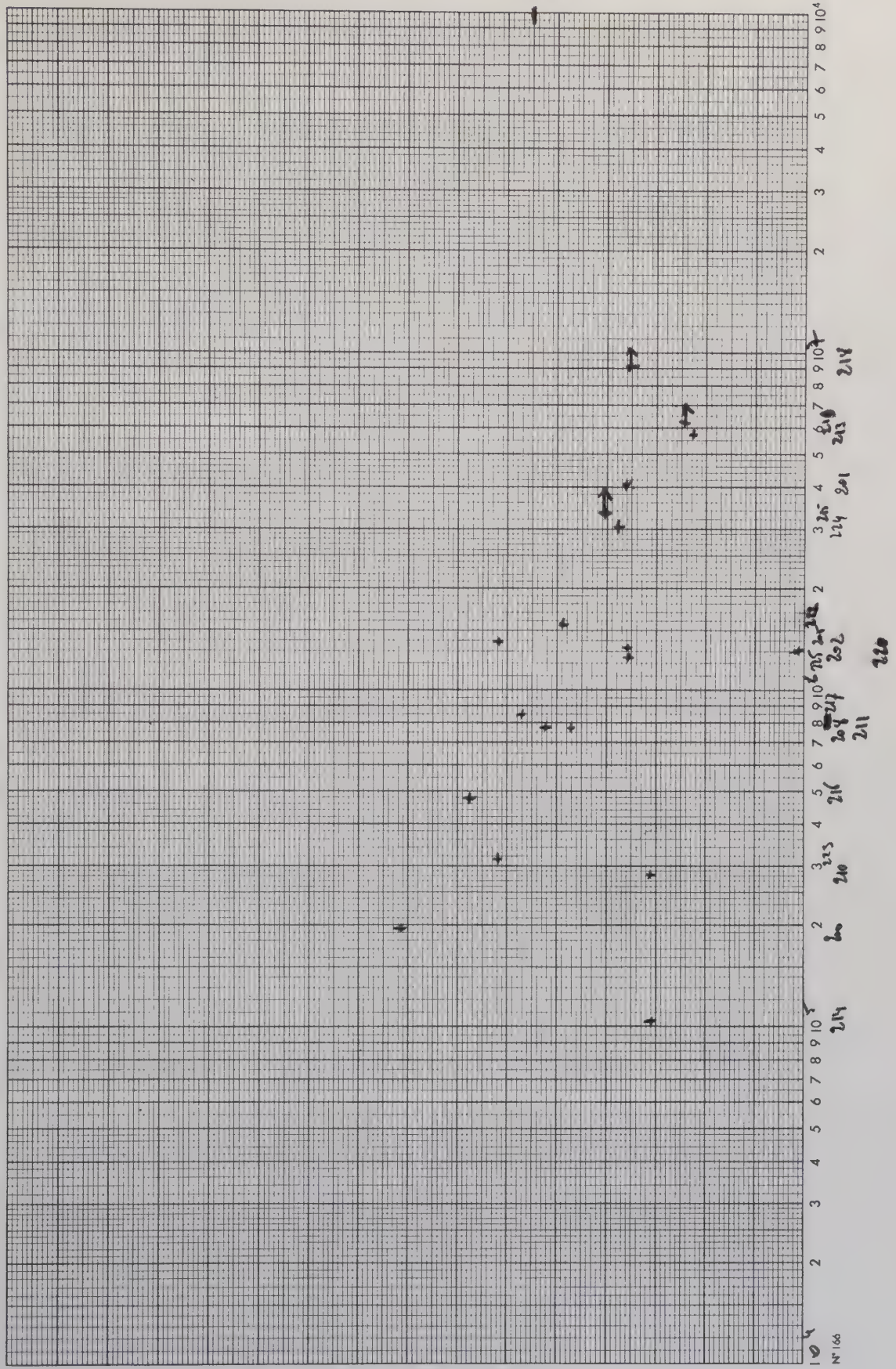
..
COURBES de WOEHLE R

g. N
→ nequeque

limit
star type

Cyds.

Centauri

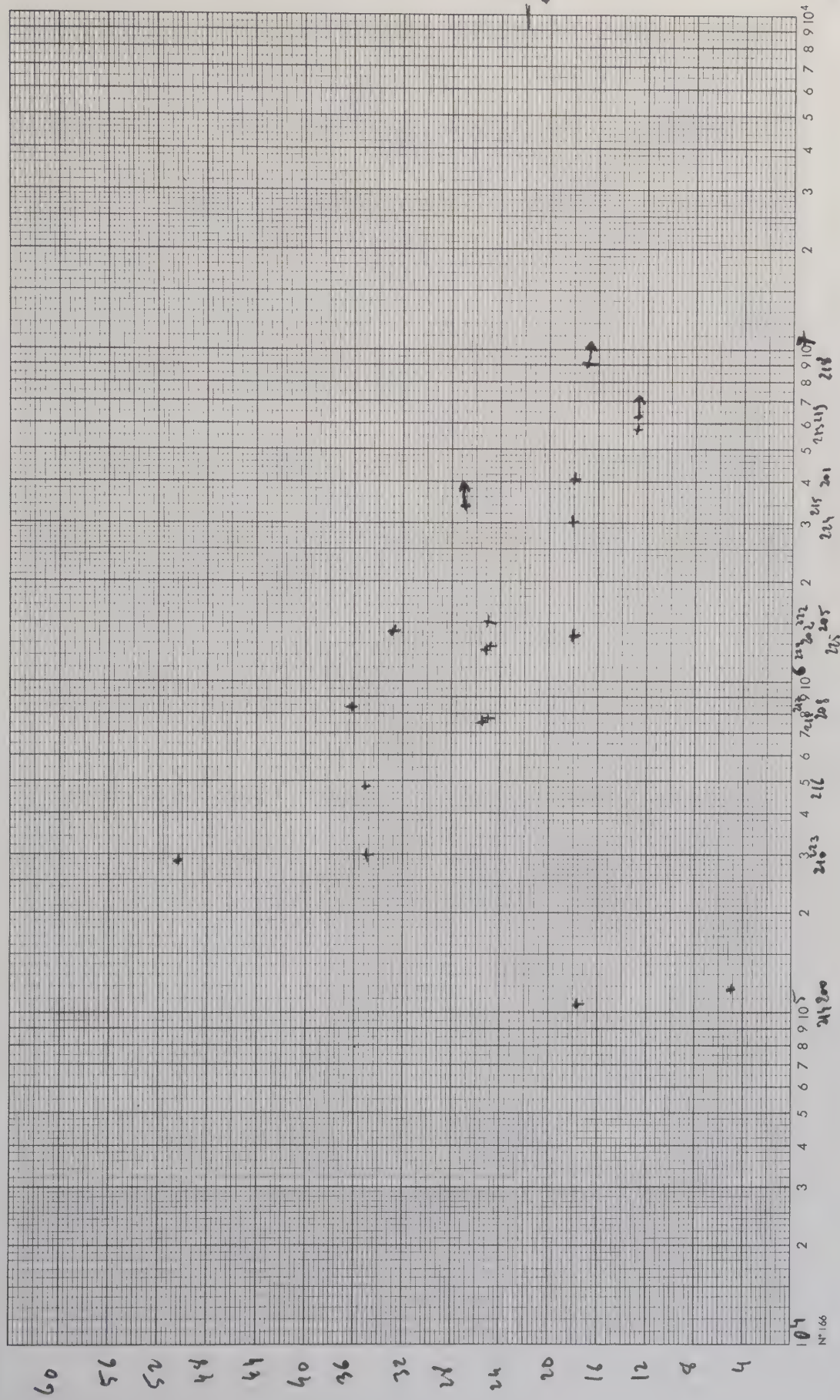


x
→ moy. rouge

— limite
électrique

cycles

x zéro



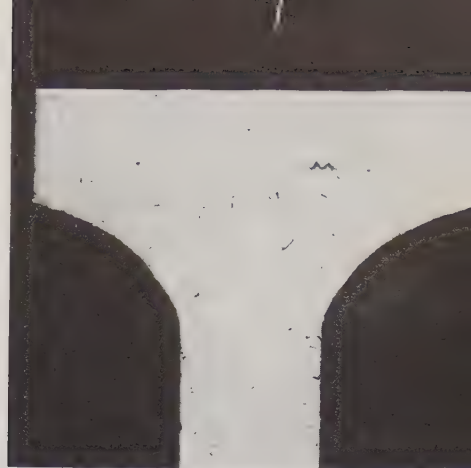
MICROGRAPHIE DE STRUCTURE

Echantillon C

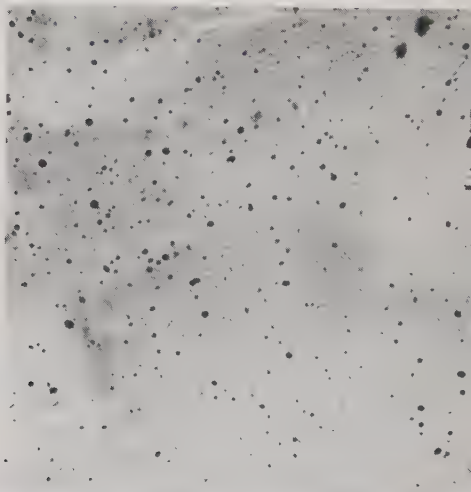
attaque MURAKANI

présence de pores

5' g x 8 x 1 x 2,2



g x 60



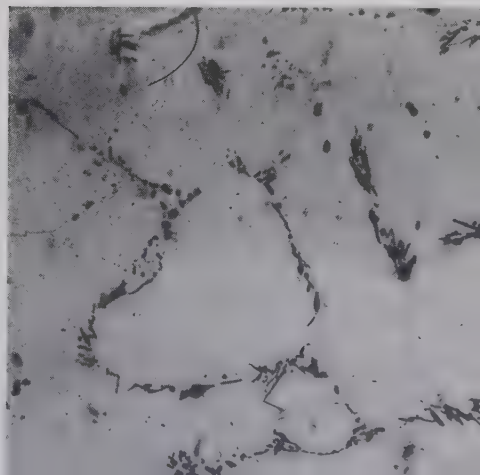
aiguilles de carbures



5' attaque MURAKANI

45 x 8 x 1,5

révèlation carbures aux joints de grains



M I C R O F R A C T O G R A P H I E S

prises

AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

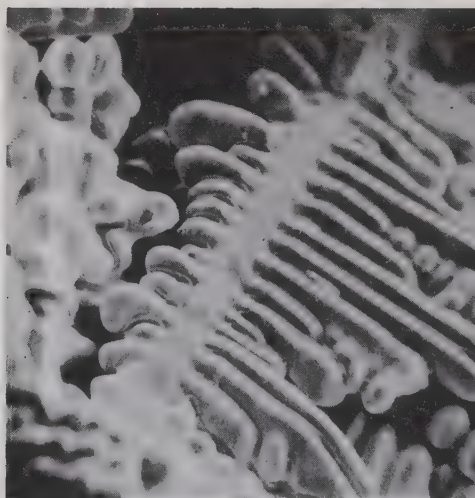
Echantillon C n° 203

fissure visible à l'œil nu tout autour de l'éprouvette
rupture à la main par légère flexion
éprouvette non fatiguée, structure avec dendrites et retassures.

gx21



zone dendritique g x 355



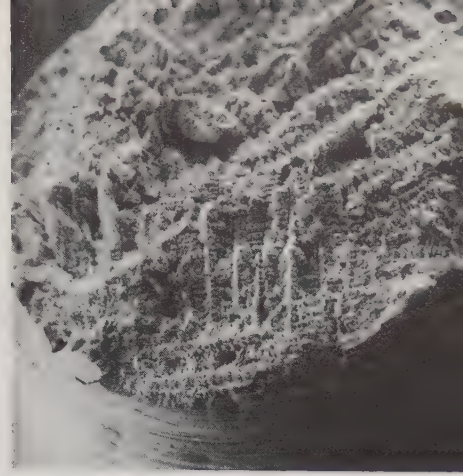
grossissement presque identique sous un autre angle g x 365



gx80

Echantillon C n° 211

Rupture 779.100 amorce de fissure par rayure d'usinage, dendrites



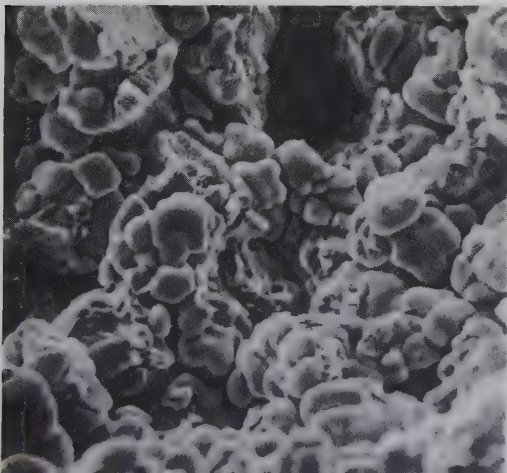
g x 125



g x 320



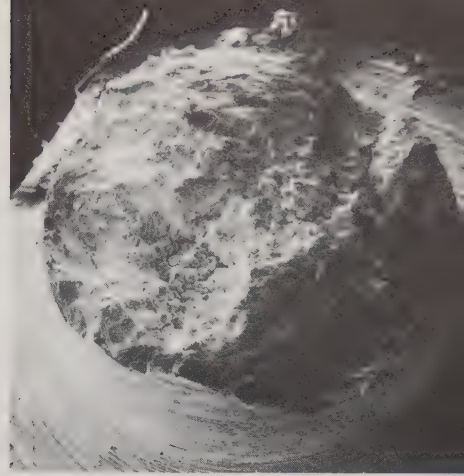
g x 785



g x 325



gr x 53



Echantillon C n° 217

rupture coté bielle 844.200

y = 7,2

x = 16

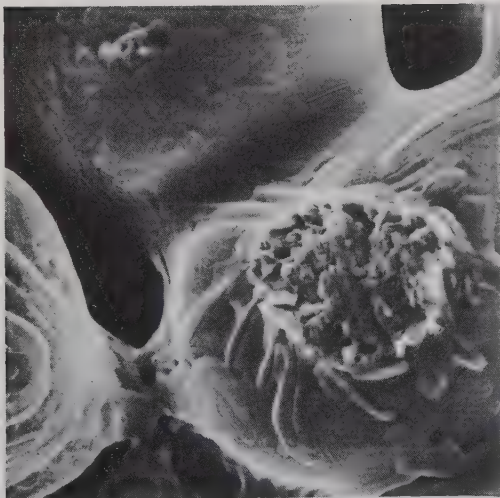
frottement interne

métal ayant subi torsion

gx 1400 fissure



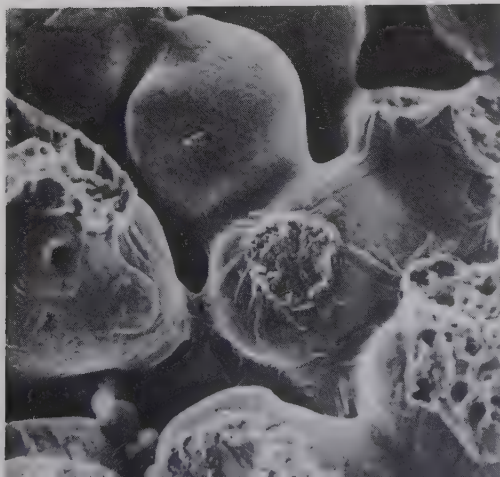
gx 1400
révélation de
goutte froide



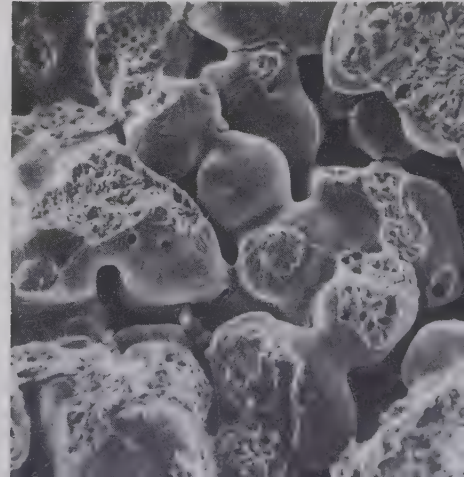
gx 2800
fond de la fissure



gx 2.800
rupture sur
dendrites ayant
une torsion

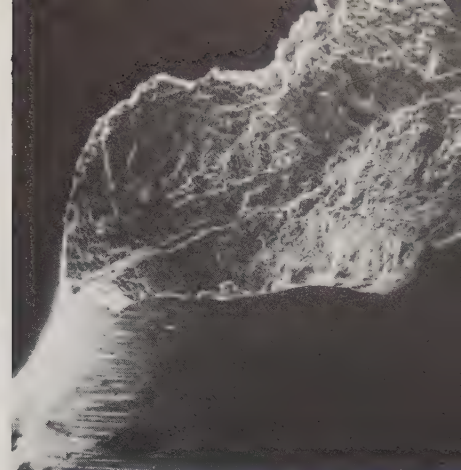


gx 700
zone de rupture
au niveau
des dendrites

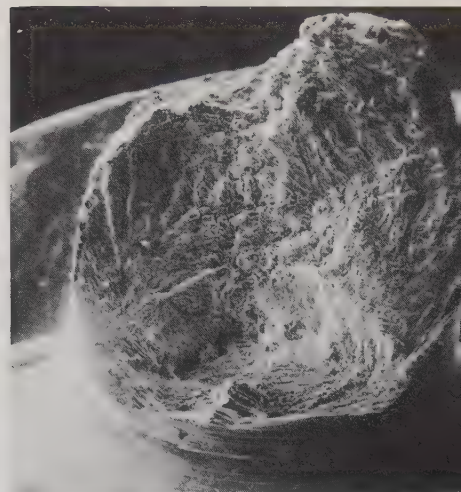


Echantillon C n° 222
rupture 1.560.900

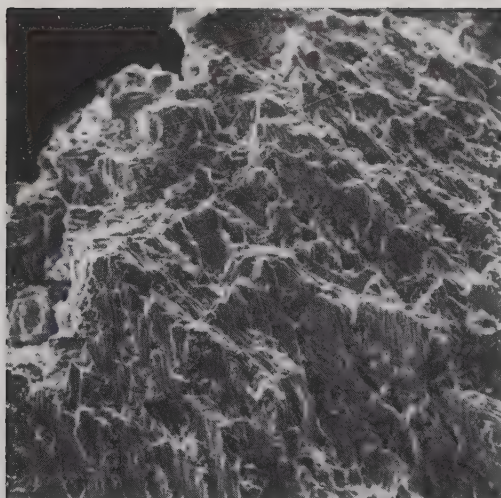
gx 50



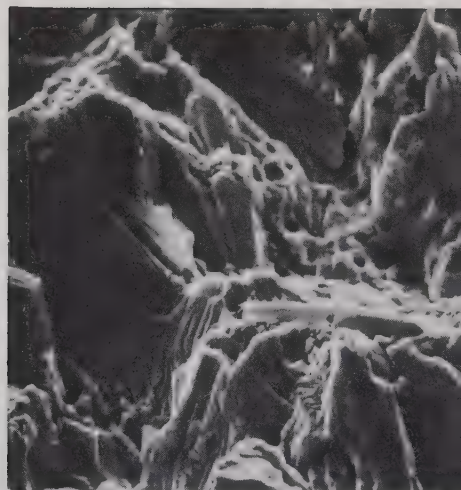
gx 1200
pic d'arrachement



gx 310



gx 240 fissures



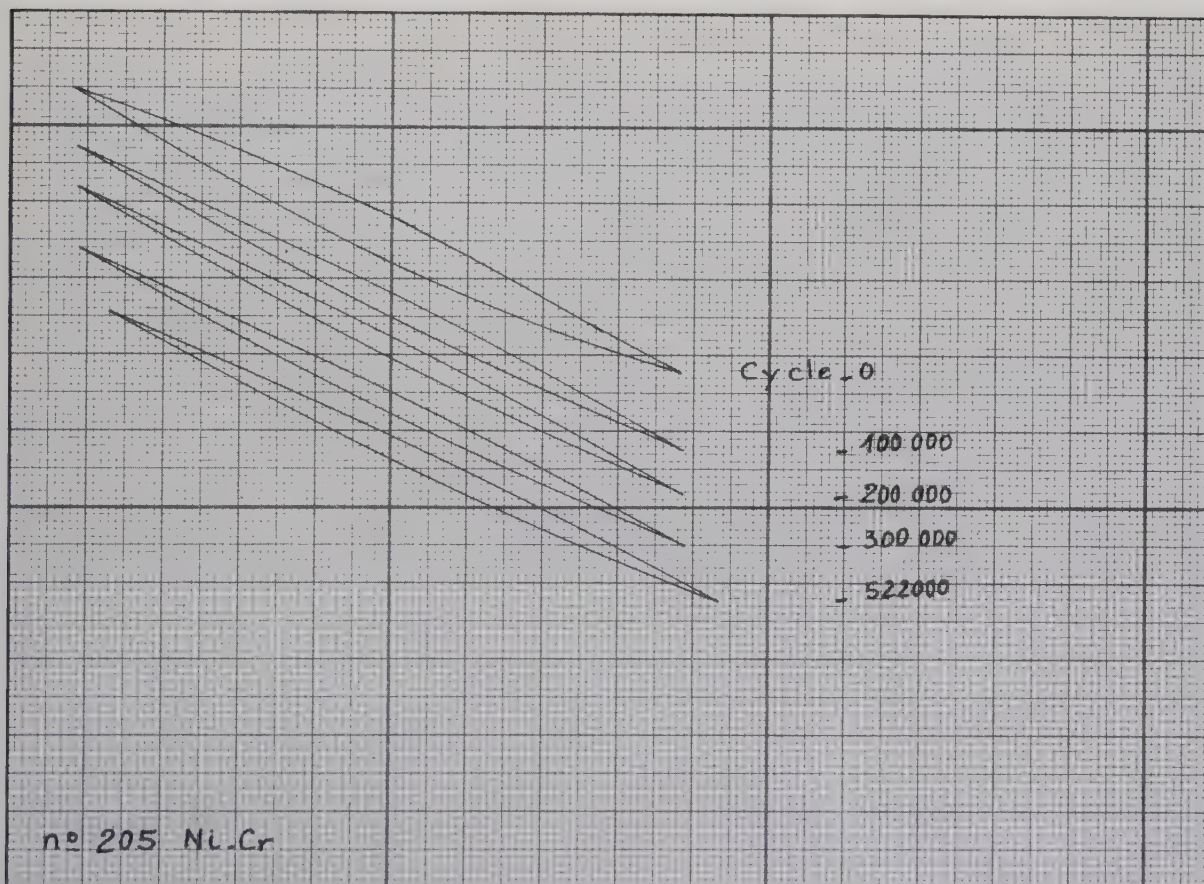
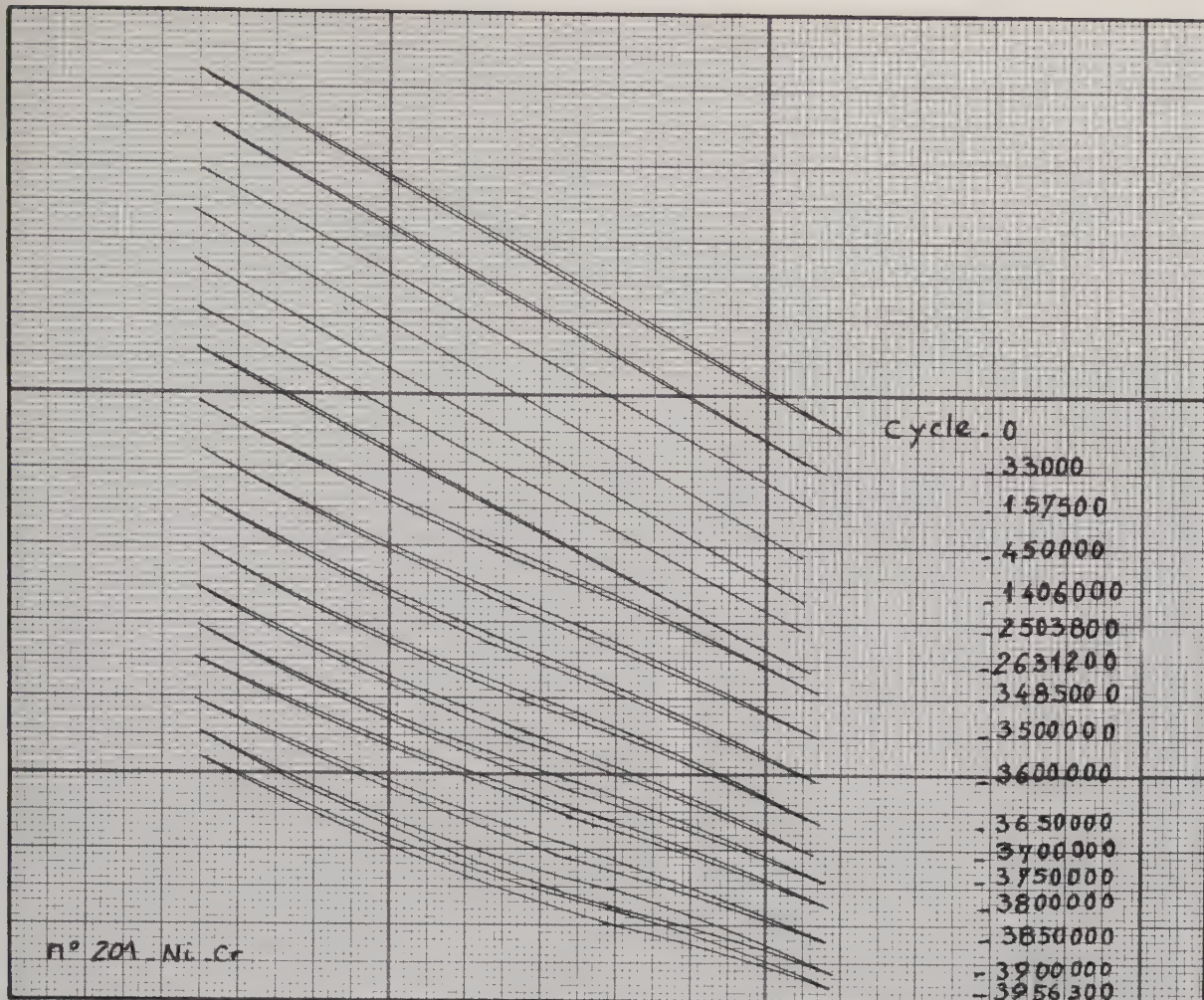
g x 310
ures d'usage

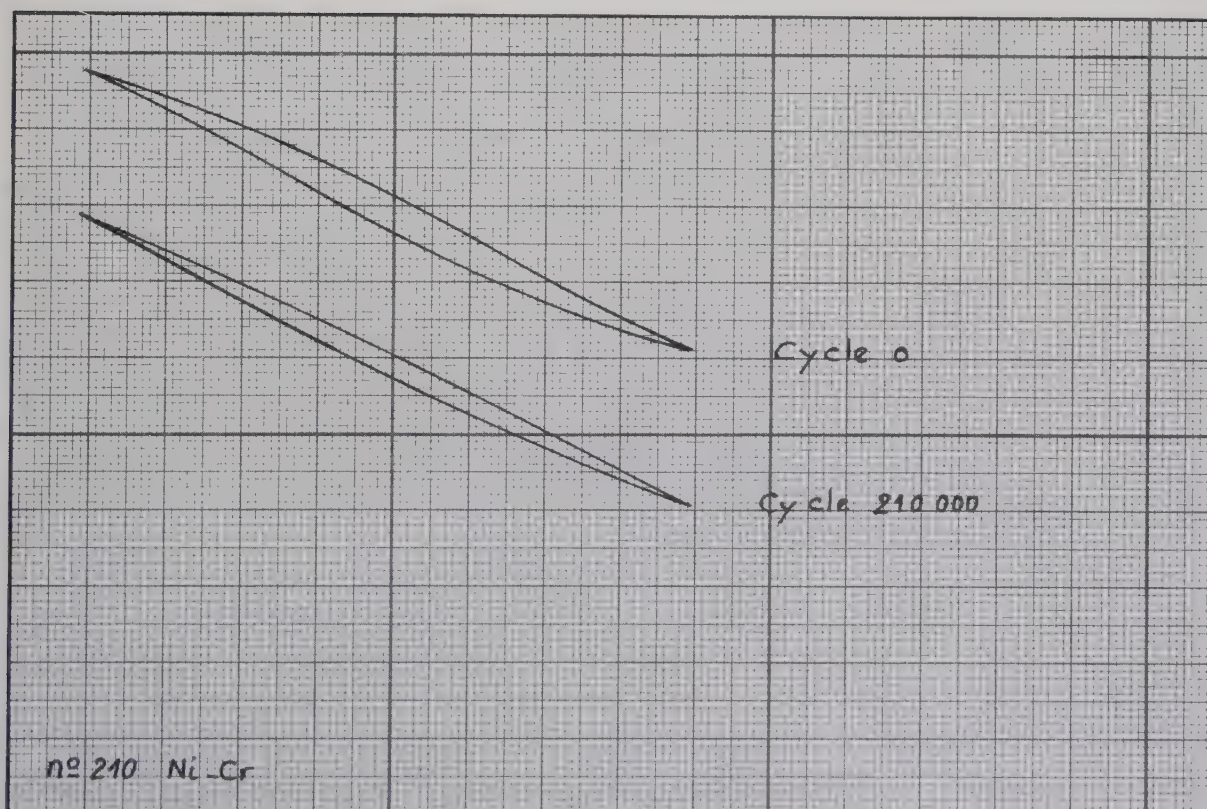
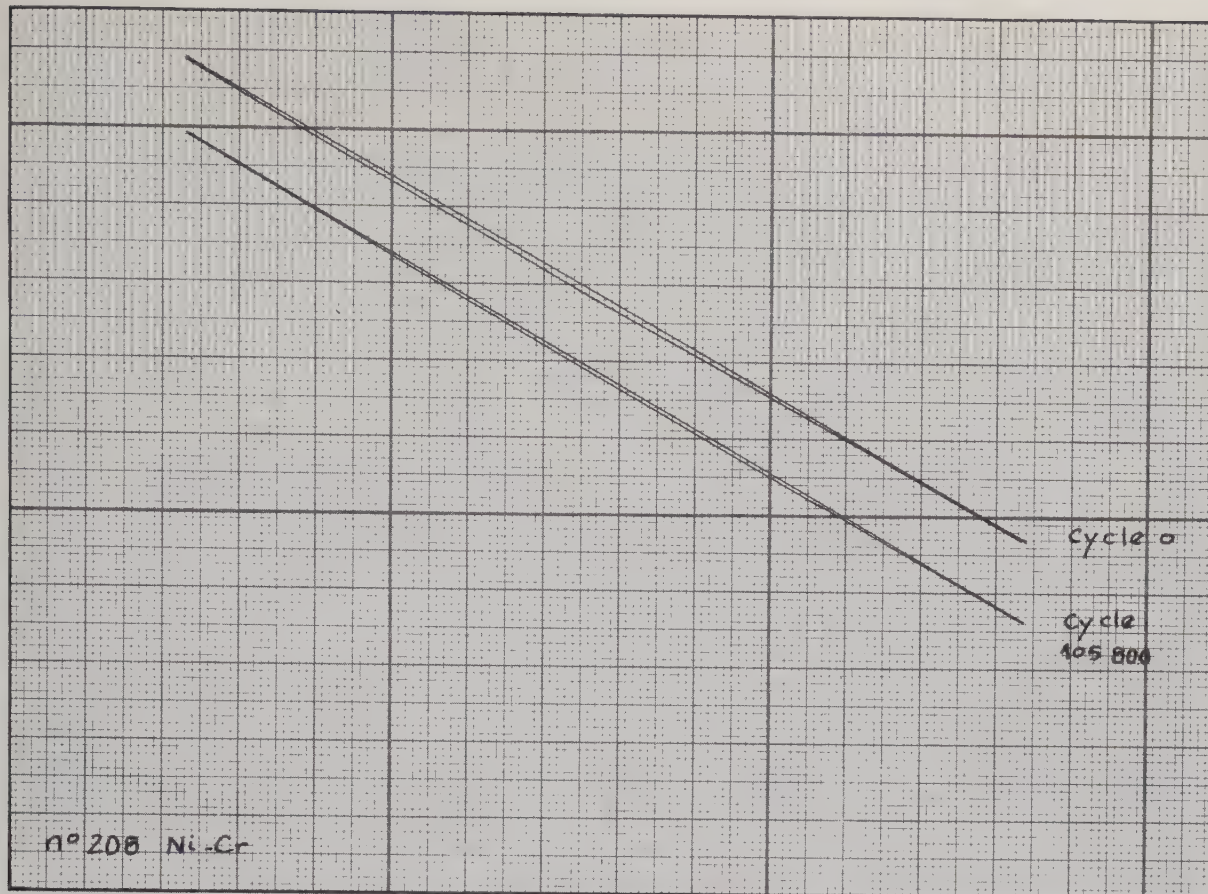


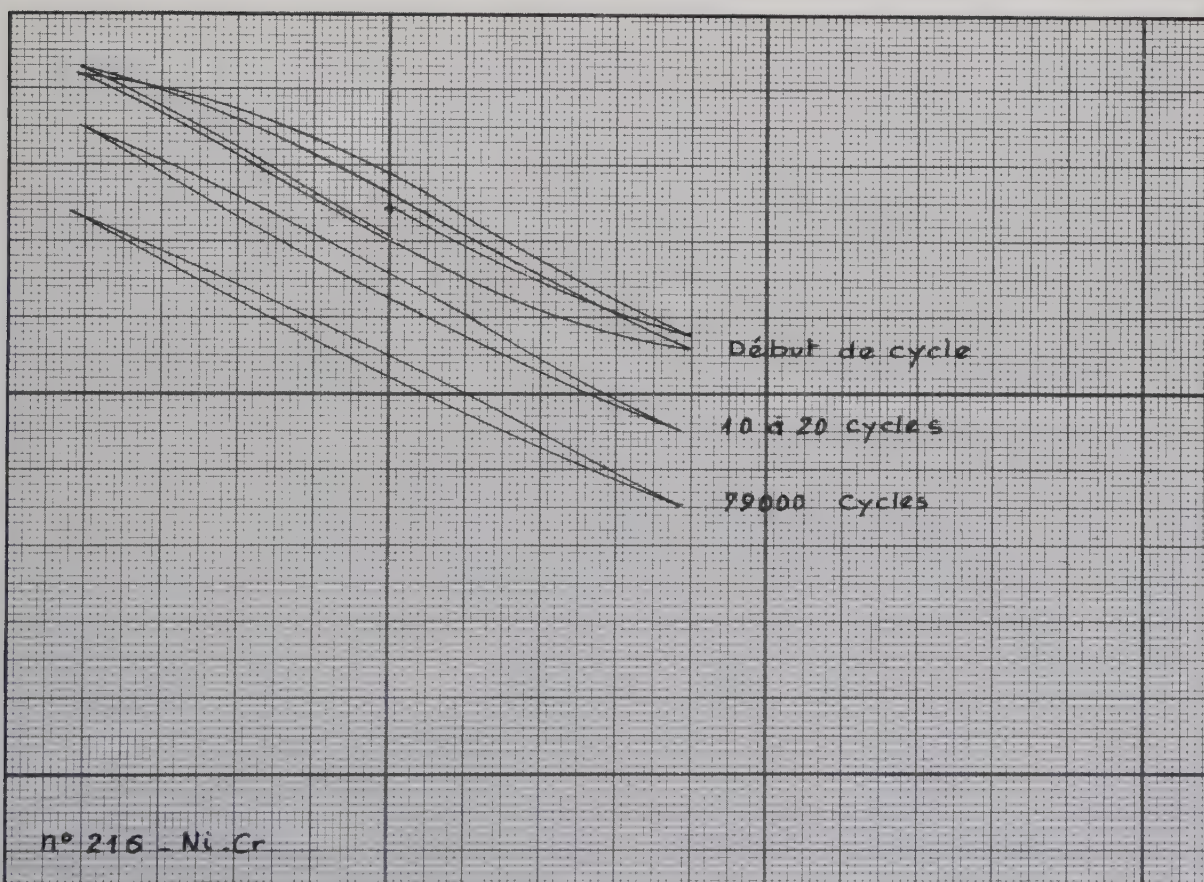
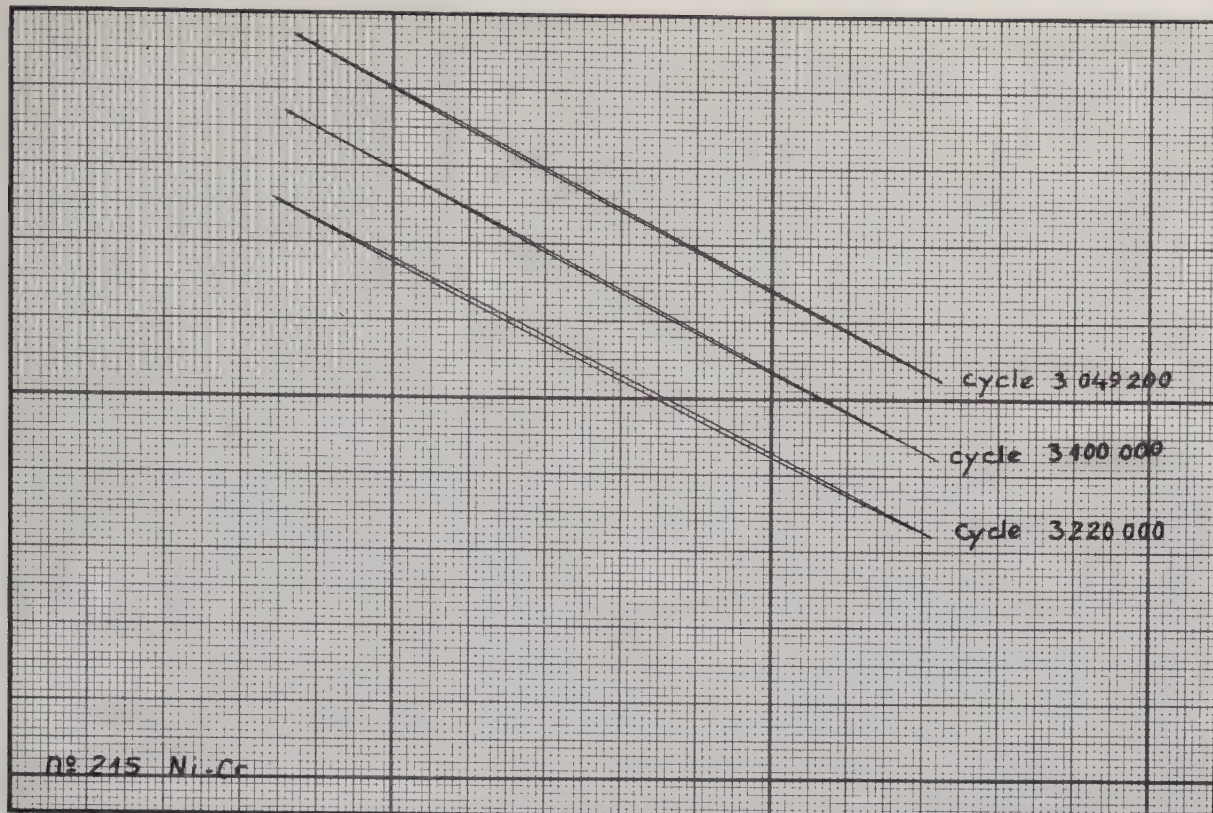
g x 1200

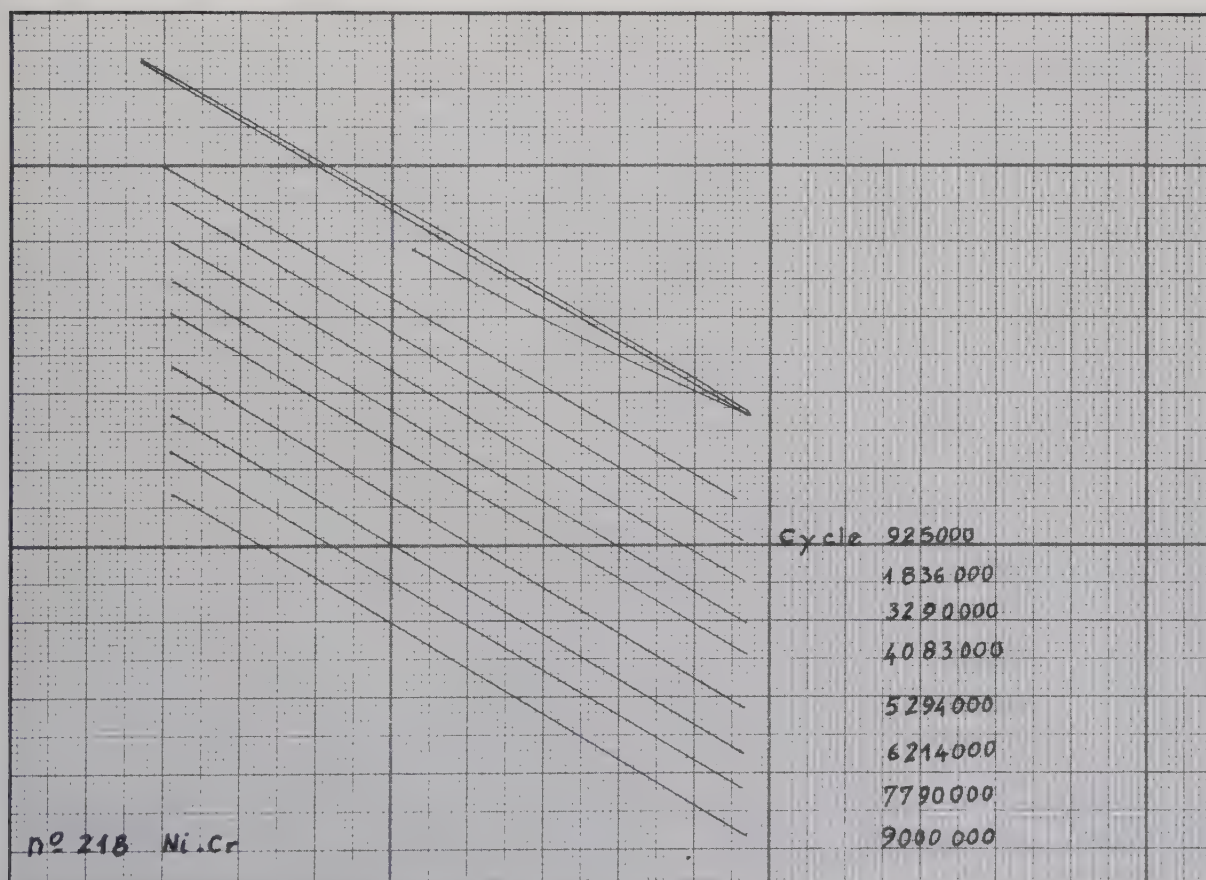
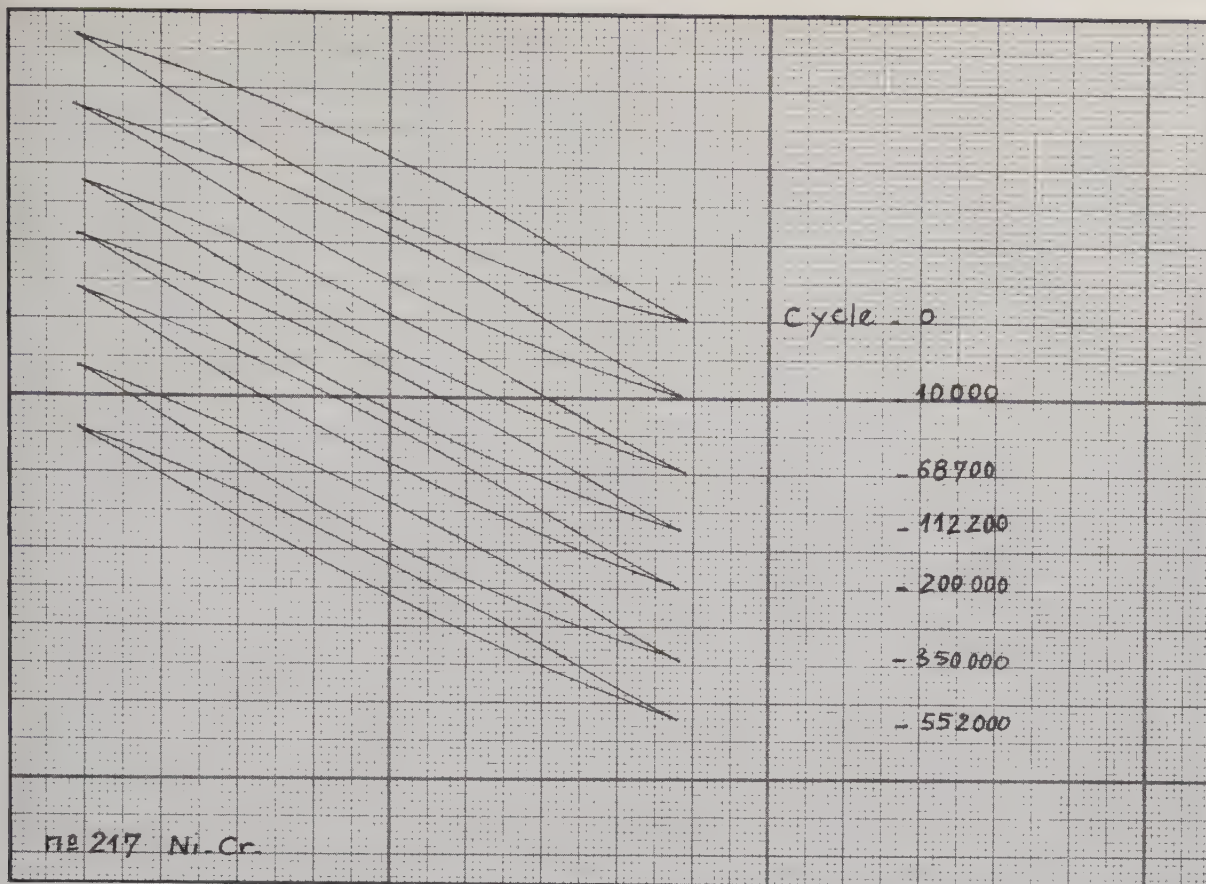


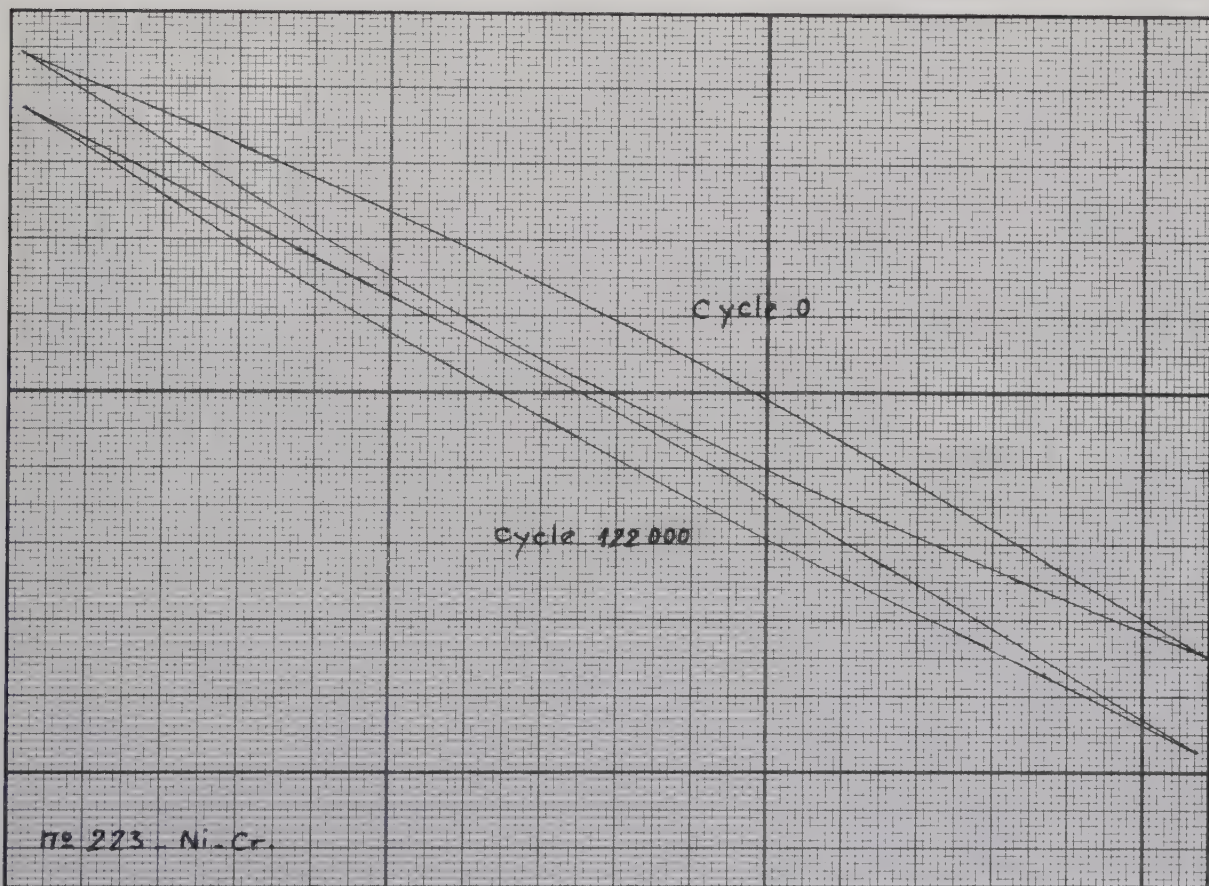
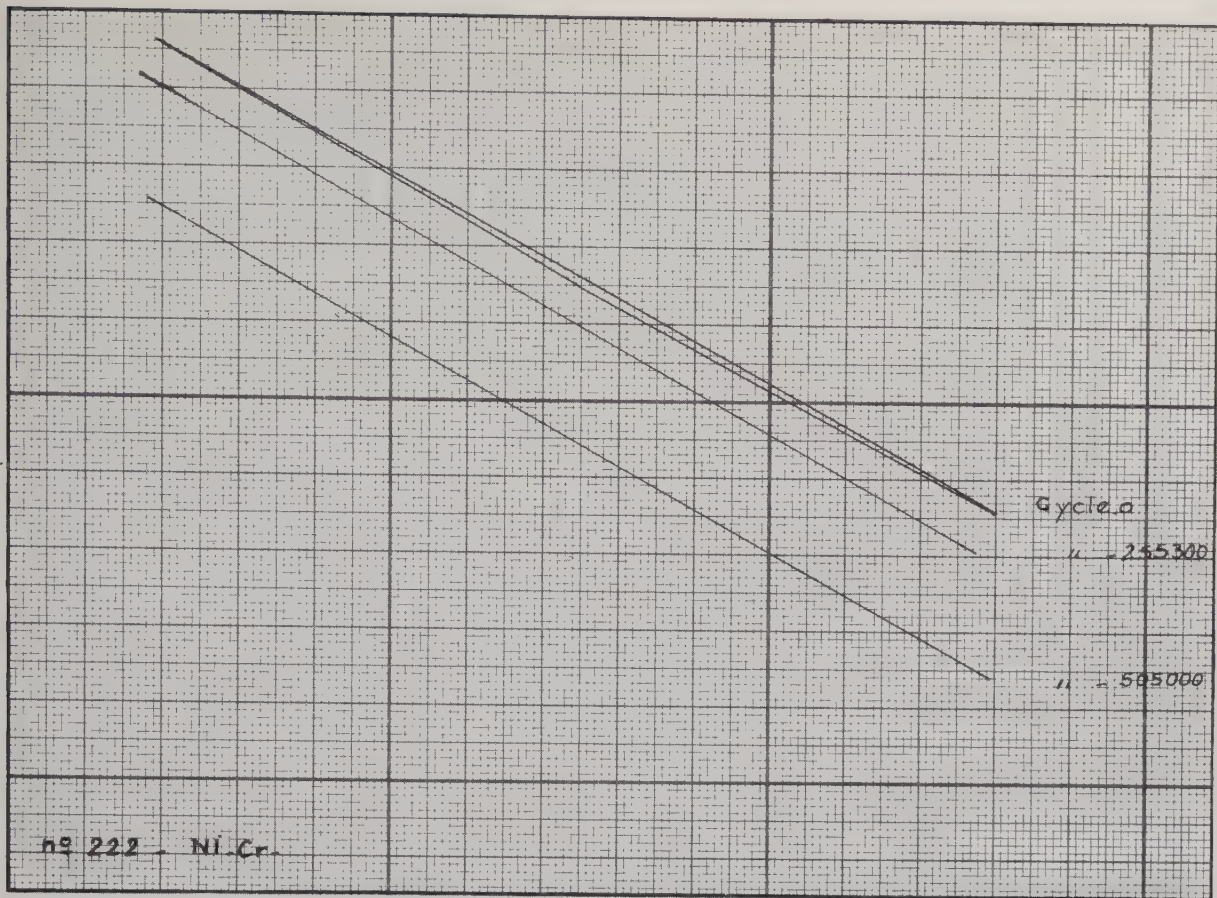
VARIATION de la FORME de la COURBE du CYCLE d'HYSTERESIS
en fonction du Nombre de Cycles

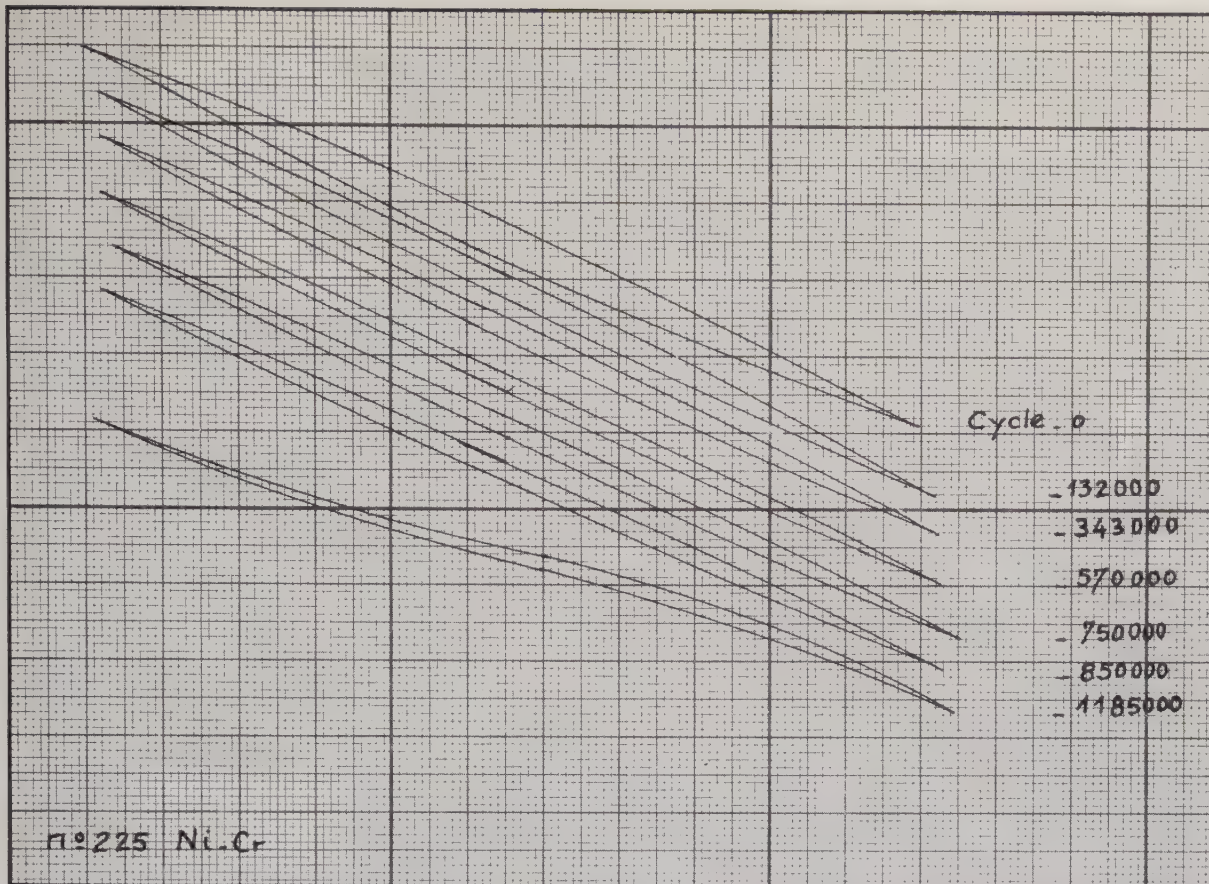












-2-4-2-5 -(suite) -

Limite élastique :

éprouvette n° 221 n'ayant pas subi d'écrouissage

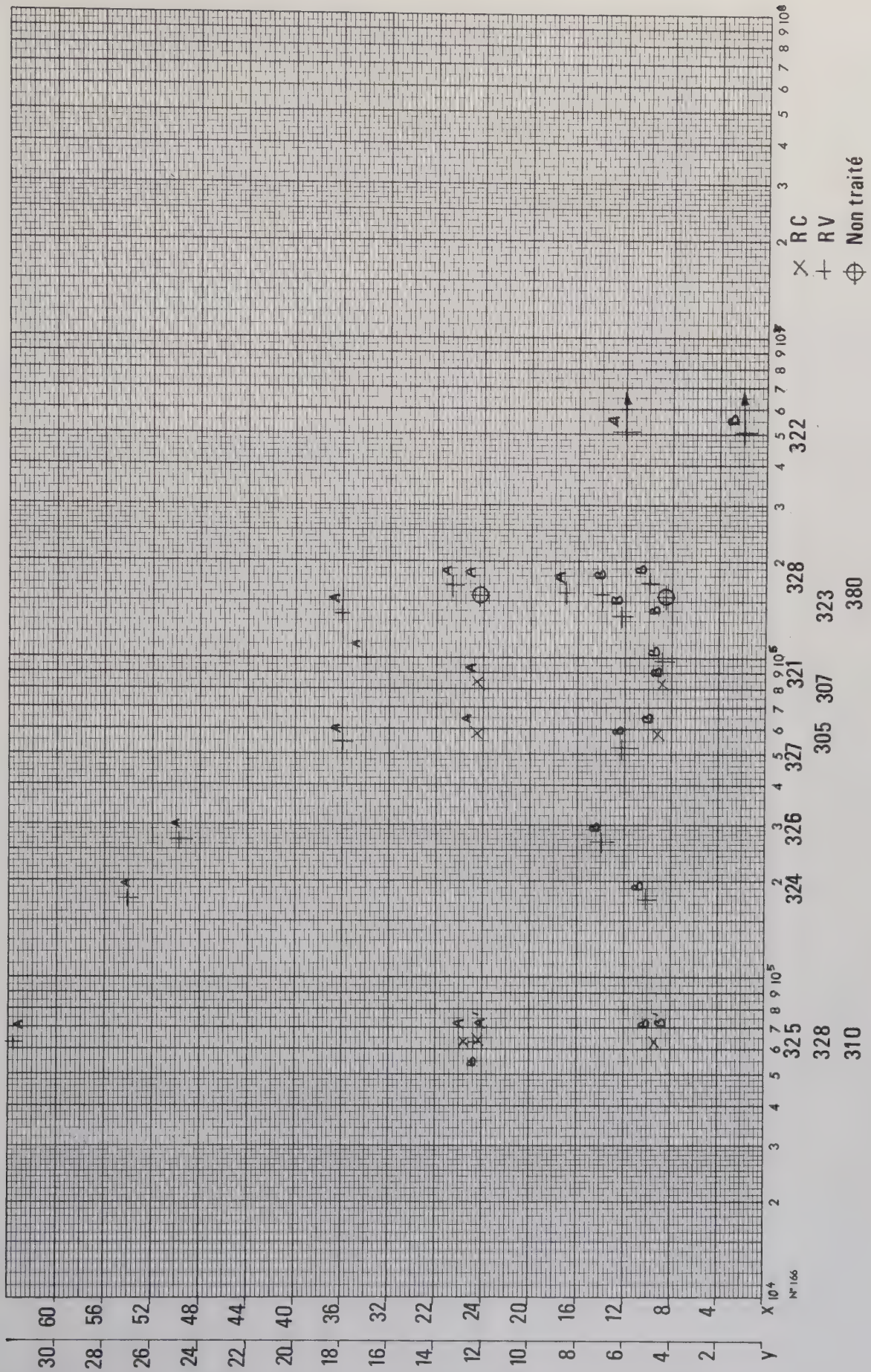
$$\alpha = \frac{9,5}{22,14} = \frac{42,9}{2} = 21,95 = 22 \times 10^{-3} \text{ rd}$$

ALLIAGES d' O R S

A U

Echantillons Type N°		Nombre Cycles rupture	N - cm	Rd 10 ⁻³	K Pente de la courbe
D ₀	321	978.700	4,35	34,8	0,12
	22	5.066.300	2,10	12,75	0,16 non rompu
	23	1.369.800	6,45	36,2	0,17
	24	173.400	9,05	54,5	0,16
	25	62.200	12,65	64	0,19 photo
	26	268.900	7,75	50	0,15
	27	546.900	6,15	36,4	0,16
	28	1.690.800	5	26,9	0,19 photo
	29	1.589.500	7,1	17,85	0,31
	305	596.100	4,85	24,4	0,19
D ₁	7	840.000	4,68	24,85	0,17
	8	62.900	4,67	24,40	0,19
	9	variation frottement interne			
	10	633.700	24,67	24,85	0,18
D ₂	380	1.547.600	9,04	49,7	0,18
	382	1.408.000	9,35	49,3	0,19
E	301	22.100	2,78	11,5	0,18

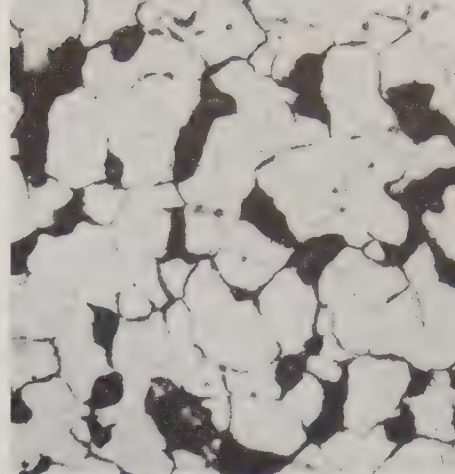
COURBES de WO E H L E R



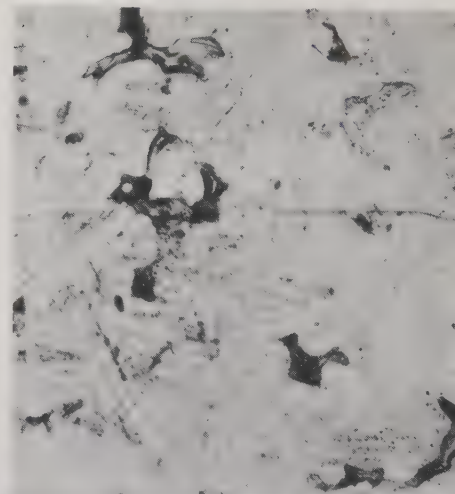
MICROGRAPHIE DE STRUCTURE

recristallisation gx 45 x 8
précipités
dans
les joints

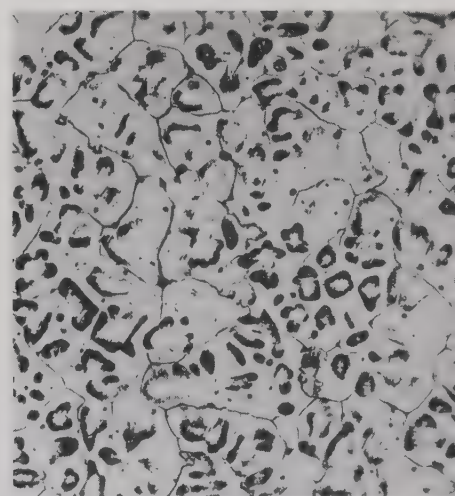
Au 20 " Echantillon D₀ recuit au four 700°
Polissage électrolytique 80 m A
par le liquide de Struers



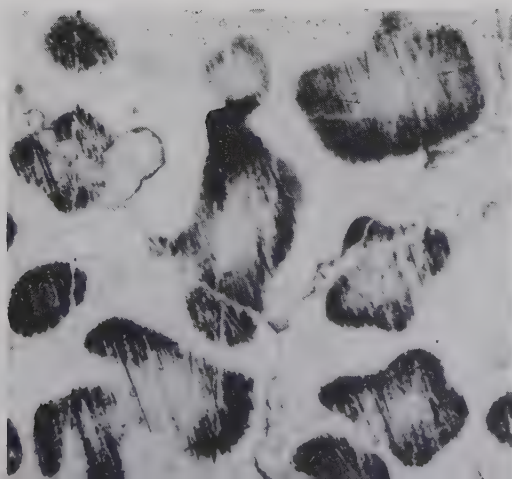
Echantillon D₁ revenu bain de sel 400 ° légère inclusion
(durcissement par amélioration gx 45 x 8



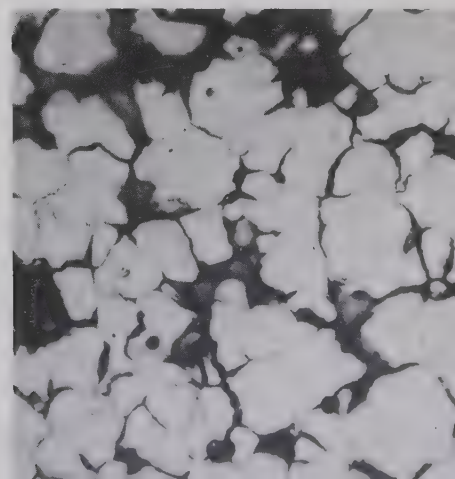
Echantillon E
sous-structure gx 45 x 8



Echantillon E
30" gx 45 x 8



Echantillon E
20" 80 MA
gx 45 x 8



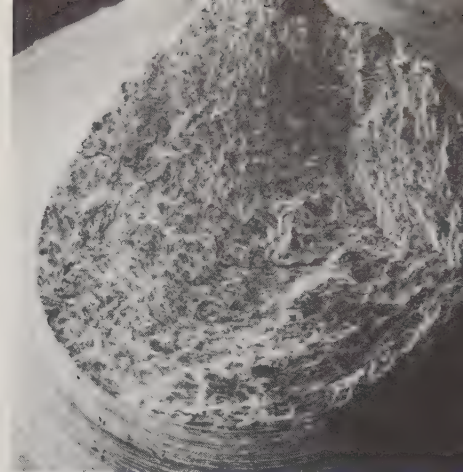
M I C R O F R A C T O G R A P H I E S

prises

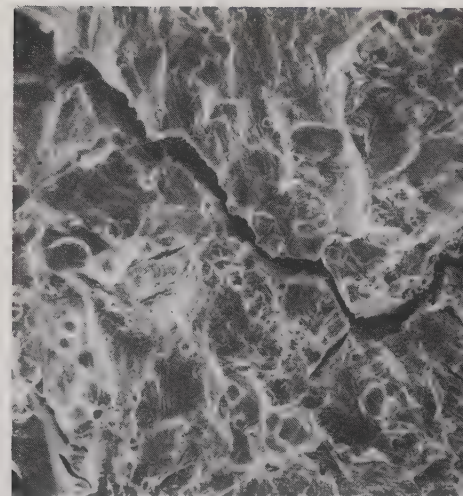
AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

g x 48.

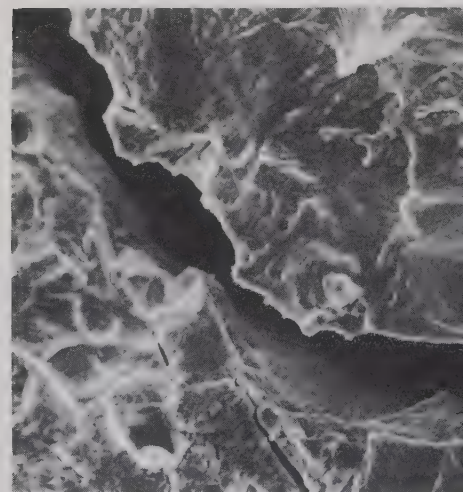
Or Ech. 328. D₀ revenu
Rupture 1.690.800 près de la bielle



g x 650 vue de la fissure centrale

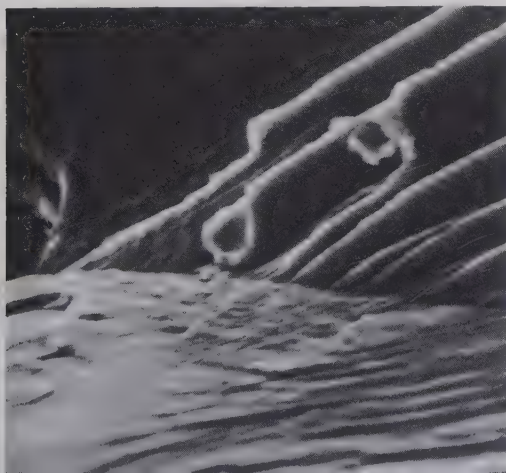


g x 2.600

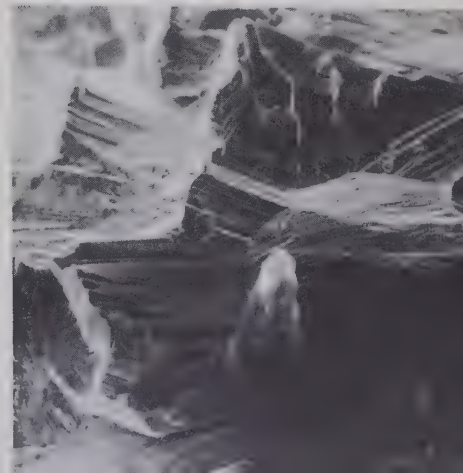


présence d'une inclusion en forme de silex.

gx6.700



gx1.350.
plans
de glissement

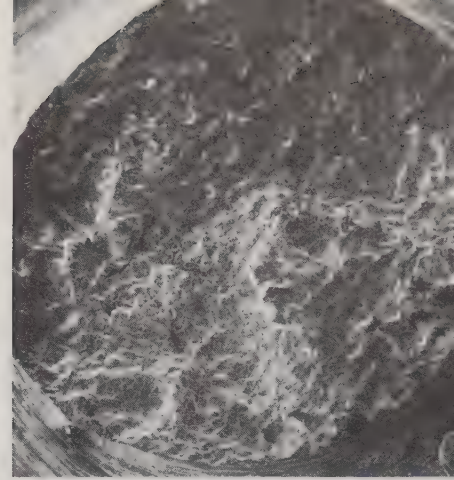


g x 68

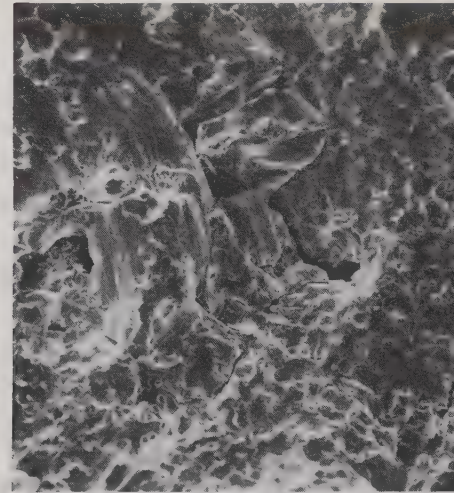
Ech. 325

D₀ revenu

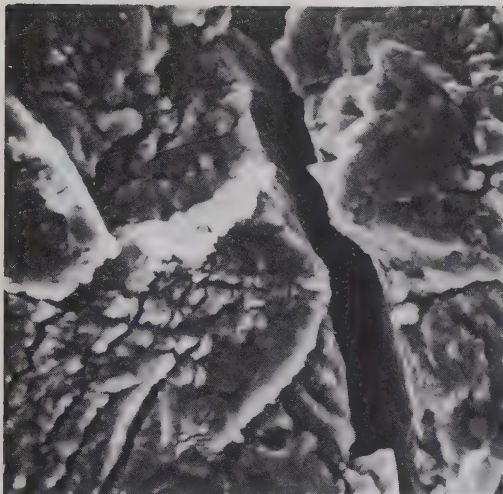
rupture 62,200 avec amplitude minimale près de la bielle



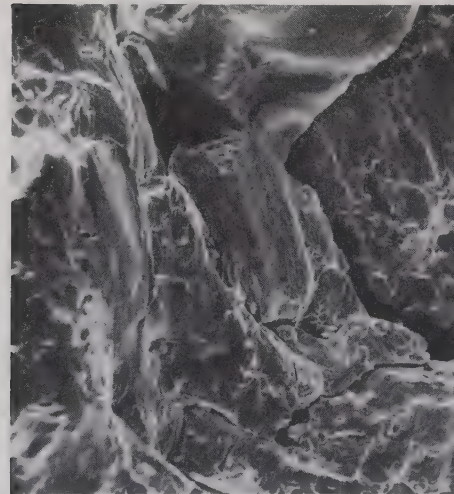
g x 255 fissures



g x 6.600



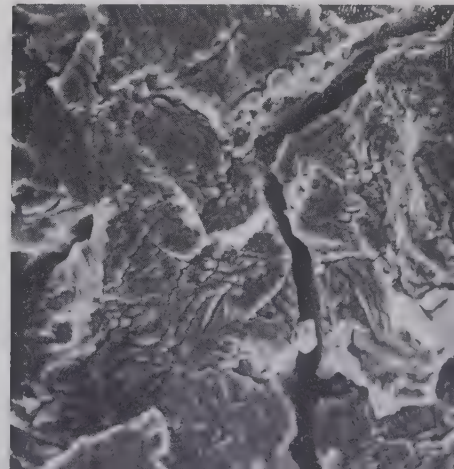
g x 660



g x 6.800

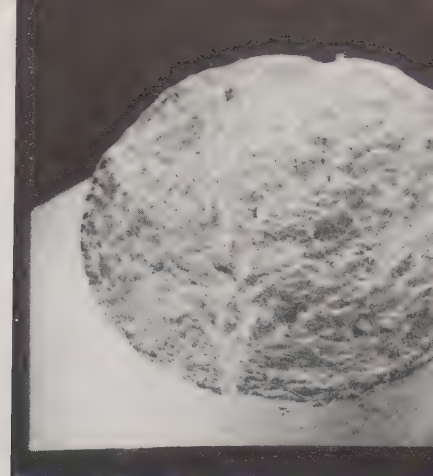


g x 2650

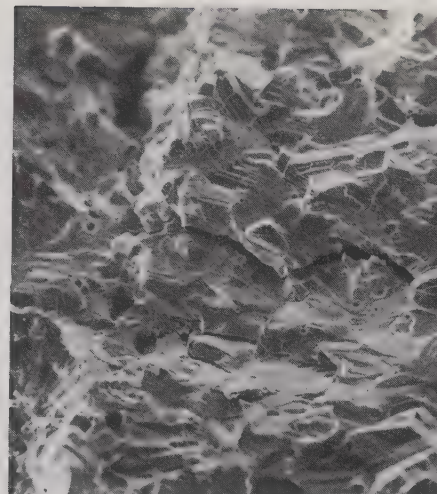


Ech. 307. D_1 recuit rupture 840.000

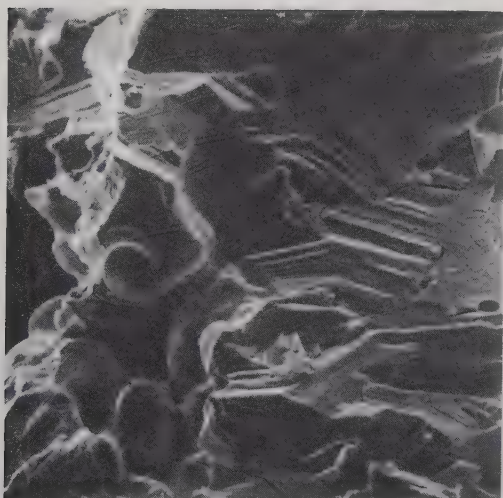
g x 56



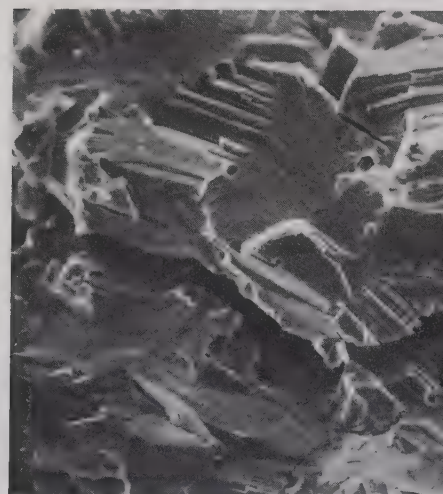
g x 400



g x 1000



g x 1.000



g x 2.000

t-être présence
de macles

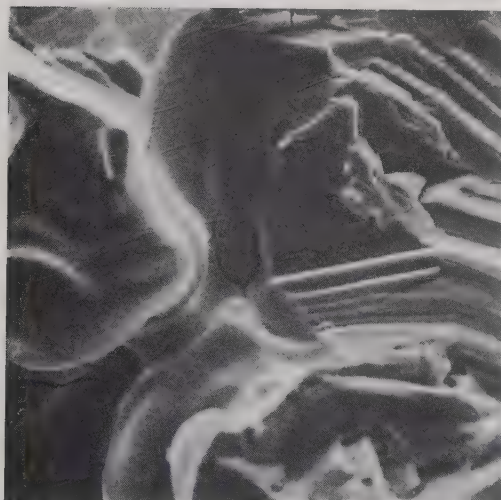


g x 1.000
plans
de glissement





g x 4.000



g x 2.000.



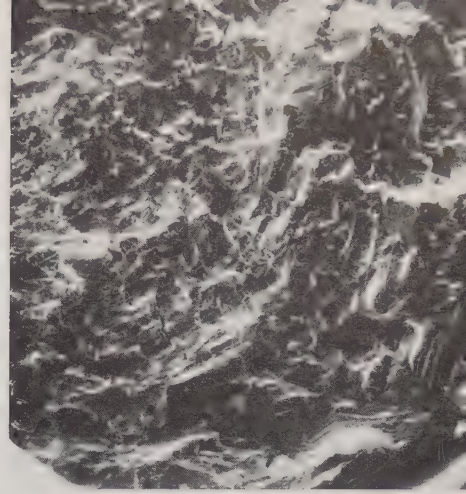
g x 4.000 inclusion

rupture le long d'un plan cristallographique
et changement de plan à travers l'inclusion.

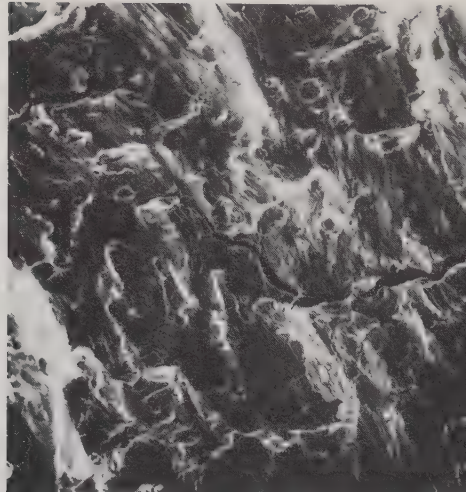
g x 88
pores et fissures plans de glissement

Or Ech. 301 E

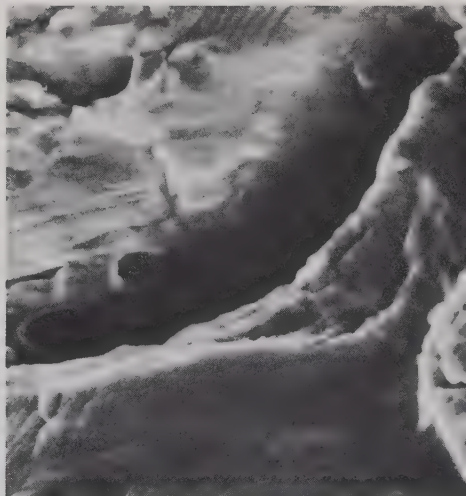
éprouvette incurvée rupture 22.100



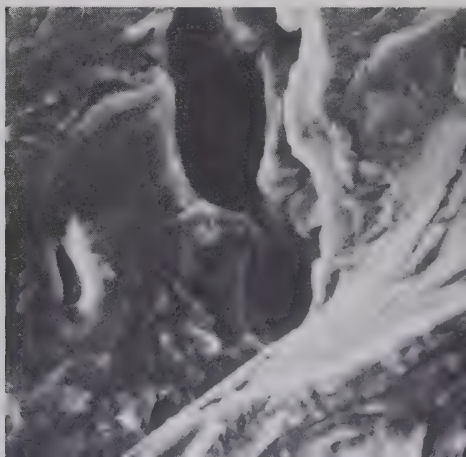
g x 360 fissure



g x 3600
traits parallèles qui semblent être des plans de glissement

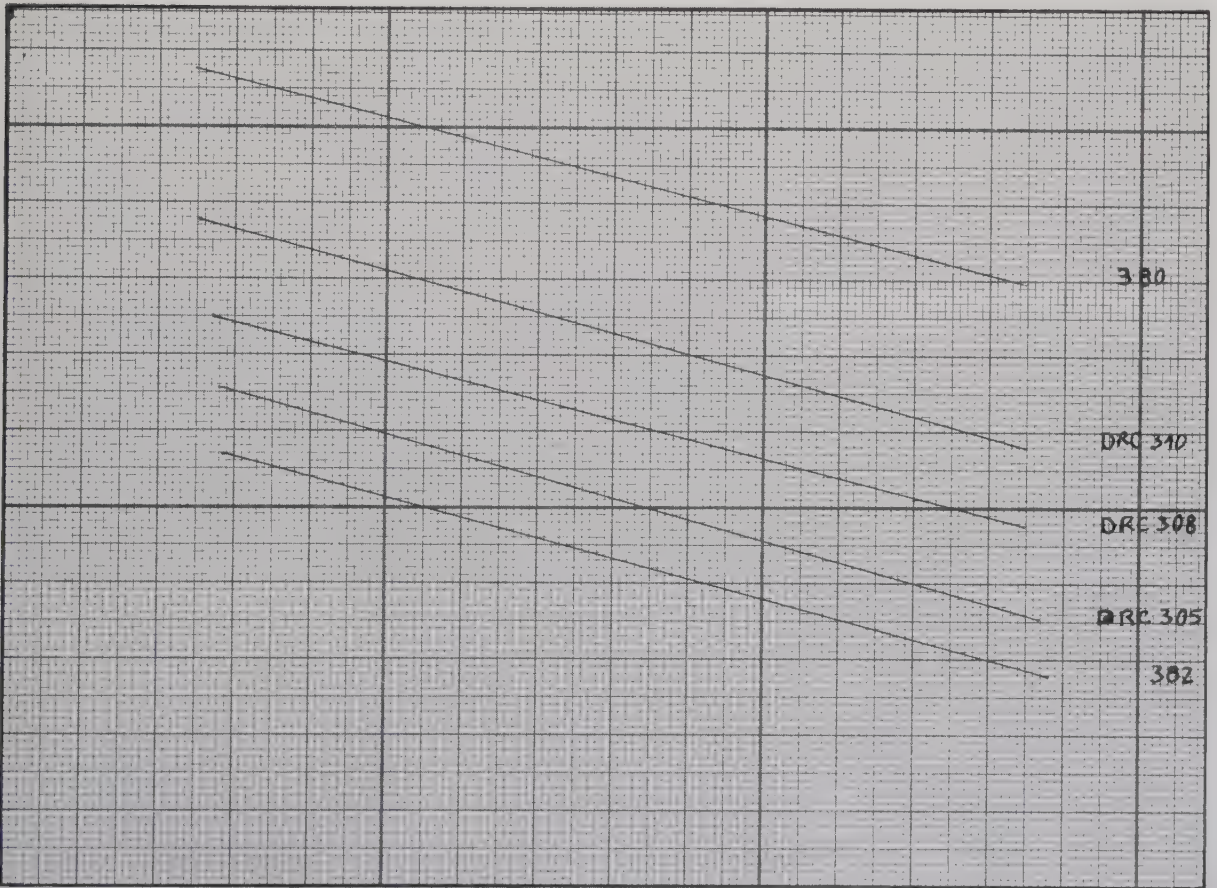
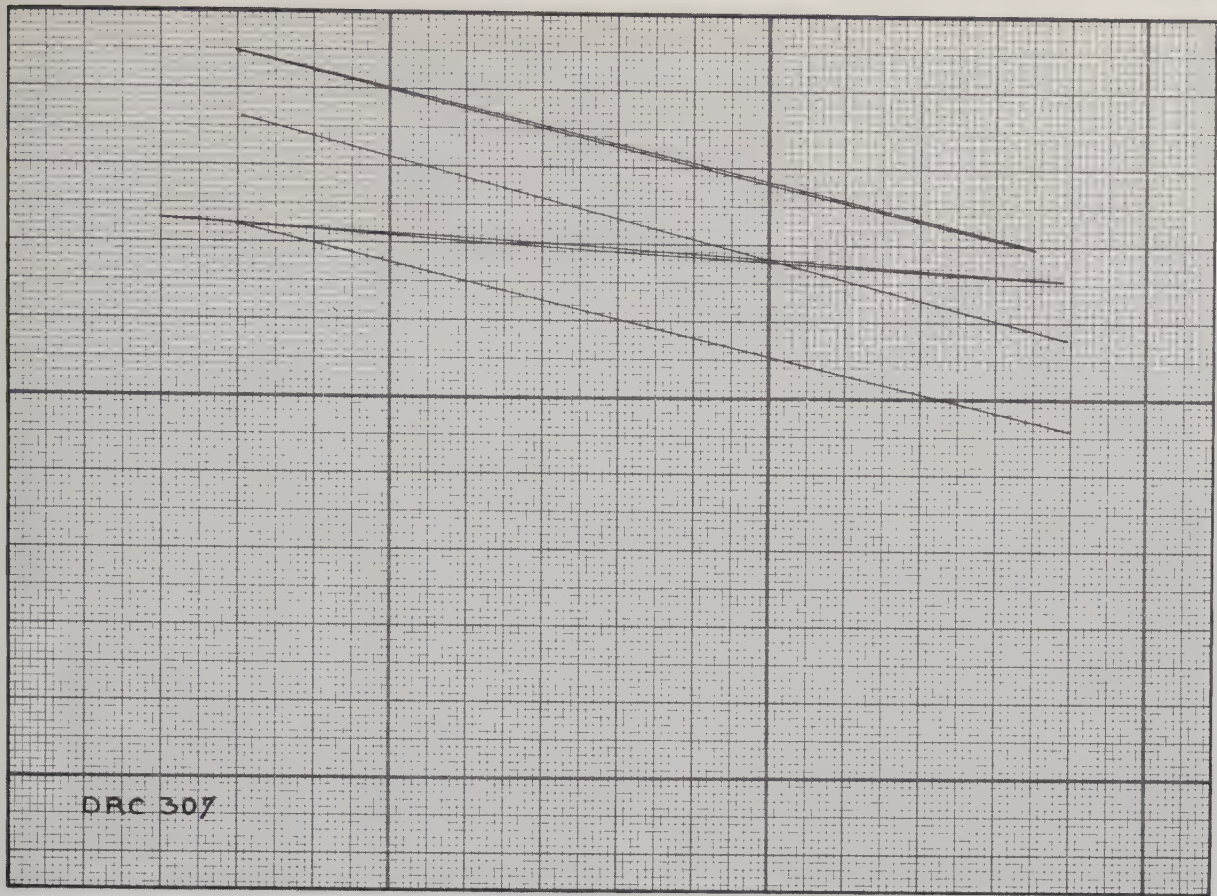


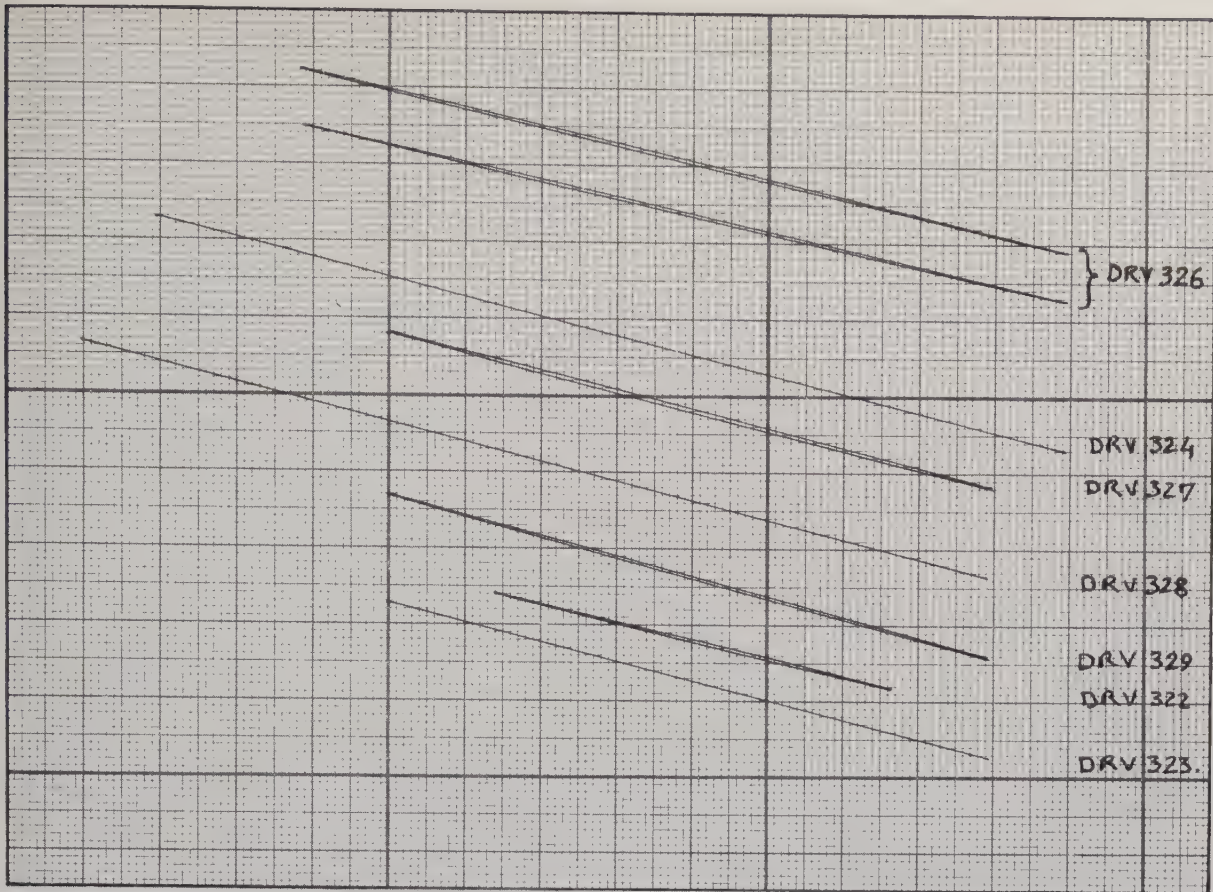
g x 3.600 présence de pores



VARIATION de la FORME de la COURBE du CYCLE d'HYSTERESIS

en fonction du Nombre de Cycles





-2-4-3-5 -(suite) -

Limite élastique :

éprouvette n° 309, or recuit n'ayant pas subi d'écrouissage

$$\alpha = \frac{15,7}{22,14} = \frac{71,3}{2} = 35,6 \times 10^{-3} \text{ rd.}$$

- 3 - INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS -

-3-1- INTERPRETATIONS -

-3-1-1- Alliage Chrome-Cobalt -

La dispersion des résultats s'est avérée trop grande pour pouvoir tracer une courbe de Woëhler. Aussi, avons-nous essayé 6 éprouvettes à des amplitudes sensiblement équivalentes.

Nous observons par exemple que l'éprouvette n° 127 n'est pas encore rompue à 8.240.000 cycles alors que l'éprouvette n° 122 s'est rompue après 106.300 cycles. Ces deux éprouvettes essayées à la même amplitude ont un module équivalent. Par contre, la cartographie du ressuage montre l'existence de porosités sur l'éprouvette 122 et aucune sur l'éprouvette 127.

L'analyse à la loupe binoculaire des fractures montre une différence très nette d'homogénéité d'une éprouvette à l'autre.

L'observation des fractures au microscope électronique à balayage montre que la ligne des fractures ne fait pas suite aux rayures d'usinage : celles-ci ne doivent pas avoir une influence fondamentale sur la rupture. Nous pouvons cependant confirmer que les rayures d'usinage se trouvent dans le prolongement des plans de glissement.

Les fractures se caractérisent en général par la présence d'un ou deux pics et de parties plus ou moins lisses. Il est cependant très difficile de faire une relation entre l'aspect des ruptures et le temps écoulé jusqu'à la rupture.

Nous pouvons ainsi observer de nombreuses fissures plus ou moins radiales sur l'ensemble de la surface des fractures. L'observation à la loupe a montré que ces fissures aboutissent à la surface de l'éprouvette où elles ont une forme approximativement hélicoïdale.

Notre but n'est pas d'étudier la fatigue des alliages constituant de nos éprouvettes, mais le comportement en torsion alternée des éprouvettes réalisées suivant les méthodes utilisées couramment en art dentaire et d'autre part, nous n'avons pas cherché à effectuer une sélection parmi les éprouvettes les plus homogènes.

-3-1-2- Alliages Nickel-Chrome -

Les études de ressuage effectuées montrent que l'homogénéité des éprouvettes est bien plus grande que pour celles en chrome-cobalt.

Bien que nous ne puissions en tirer des conclusions statistiques on peut remarquer que 8 éprouvettes en nickel-chrome ne présentent aucun défaut révélé pour 2 en chrome-cobalt.

Certaines mauvaises coulées, révélées au microscope à balayage sont peut-être dues à une erreur de manipulation du prothésiste au cours du refroidissement par exemple. Celles-ci conduisent à une structure dendritique très marquée. De même que pour les chrome-cobalt, il est difficile d'établir une relation entre la morphologie des fractures et le nombre de cycles avant rupture.

La dispersion des mesures est nettement moins importante et permet d'avoir une idée de la limite de fatigue qui est égale à 0,6 fois la valeur de la limite élastique.

Nous retrouvons le même résultat que dans la littérature pour le chrome-cobalt en flexion alternée. Il semble qu'en règle générale les éprouvettes ayant un fort module de torsion dès le départ résistent plus longtemps. Mais cette variation de module n'est pas liée à la présence de porosité par l'étude de ressueage, mais plus vraisemblablement reliée à la structure cristalline.

-3-1-3- Alliages d'Or -

Nous sommes assez gênés dans l'interprétation par l'absence de points permettant de déterminer la limite de fatigue. Nous pouvons cependant l'estimer empiriquement et tirer les conclusions suivantes :

En dépit des retassures très abondantes repérées par la méthode de ressueage, les éprouvettes n° 305 et 310 présentent pour un module semblable des porosités superficielles. La dispersion des résultats se situe dans les limites raisonnables pour des essais de fatigue en torsion.

Les éprouvettes simplement recuites ont une limite de fatigue nettement inférieure à celle des éprouvettes revenues.

Nous observons que la valeur du module des éprouvettes recuites est légèrement inférieure à celle des éprouvettes revenues. Le revenu a donc permis un durcissement du métal.

Le microscope à balayage a permis de révéler l'orientation de cristaux associés par rapport à un plan appelé plan de macle et de plans de glissement.

-3-1-4- Courbe de frottement interne -

-3-1-4-1- Variation en fonction du nombre de cycles--

Pour les courbes où l'amplitude est insuffisante, nous observons un cycle d'hystérésis dont la surface diminue assez rapidement après le début d'application du cycle de contrainte pour se stabiliser pendant la plus grande partie de l'essai. Quelques milliers de cycles avant la rupture, nous observons une diminution progressive du module associé à une augmentation de la surface du cycle ; suivi d'une distorsion en forme d'"S" du cycle.

Nous pouvons interpréter ce phénomène de la façon suivante : l'éprouvette s'écrouit assez rapidement ce qui entraîne une diminution du frottement interne par blocage des dislocations. A l'approche de la rupture la fissure se développe très rapidement ce qui entraîne une diminution apparente du module par diminution de section et une augmentation apparente du frottement interne, par frottement des deux surfaces de la portion rompue.

L'abaissement apparent du module correspond bien à la phase d'approche de la rupture.

-3-1-4-2 - Variation en fonction de l'amplitude -

Elle nous a été particulièrement utile dans la détermination de la limite élastique des éprouvettes. Nous avons admis que celle-ci avait pour valeur le couple à partir duquel un cycle d'hystérésis apparaissait.

-3-1-4-3- Comparaison chrome-cobalt - nickel-chrome et or -

La supériorité de la résistance à la fatigue des nickel-chrome et des ors, apparaît incontestable dans la mesure où ceux-ci autorisent des erreurs de manipulation bien plus importantes, autrement dit ont une fiabilité plus élevée.

Le prix élevé de l'or limitant son emploi, l'alliage "nickel-chrome" apparaît donc comme une solution intéressante. Une étude en milieu salivaire serait cependant utile afin de déterminer l'importance du phénomène de corrosion sous fatigue ou de fatigue sous corrosion.

-3-2- CONCLUSIONS -

Notre étude sur 62 éprouvettes a permis de montrer qu'une rupture par torsion alternée de crochets utilisés pour l'élaboration d'une prothèse dentaire coulée est tout à fait concevable en fonction de trois facteurs différents :

1) Rôle découlant de la nature de l'alliage :

l'étude comparative des différents métaux a permis de constater un étalement des valeurs entre les chrome-cobalt, les nickel-chrome et les ors. Ces deux derniers offrent une fiabilité suffisante pour assurer l'absence de rupture rapide.

2) Rôle découlant du traitement thermique :

les ors ayant subi un traitement de revenu paraissent avoir des propriétés supérieures à ceux qui subissent un traitement de recuit. Les "chrome-cobalt" et les "nickel-chrome" sont peu sensibles aux traitements thermiques.

3) Rôle du polissage et des états de surface :

les "chrome-cobalt" paraissent plus sensibles aux traitements mécaniques de surface que les "nickel-chrome" et les ors.

La simplicité et la finesse dans la prédiction des ruptures par la méthode du ressuage suggère son application par le prothésiste qui pourrait ainsi vérifier la valeur des coulées.

Une étude systématique de l'efficacité réelle de cette méthode dans la pratique courante serait à entreprendre (le fait que nos éprouvettes étaient usinées accroissait l'efficacité de la méthode).

Ces différentes constatations nous ont conduit à repenser les problèmes suivants :

a) celui des coulées, en raison d'un manque d'homogénéité par la présence de pores, de fissures et micro-retassures dans les espaces interdendritiques.

b) celui du refroidissement des pièces coulées qui apparaît comme trop rapide et ceci peut-être en fonction d'une mauvaise conductibilité du revêtement.

c) celui de la dimension du crochet en fonction du module d'élasticité : les alliages "chrome-cobalt" répondent mieux aux crochets présentant un bras de levier très long, et les ors correspondent davantage à des crochets de faible portée.

Il est bon de signaler que les dessins des crochets étudiés par Roach et Ney furent établis à une période où l'on ne travaillait que l'or.

Des études complémentaires permettraient :

1) par une analyse de la morphologie des ruptures des crochets en bouche, à l'aide du microscope électronique à balayage, de déterminer la nature véritable de cette rupture.

2) par une étude comparative avec la morphologie des fractures d'éprouvettes essayées dans des conditions données en laboratoire d'apporter probablement la réponse à cette question, et par là même d'orienter de futures recherches dans la géométrie des crochets et sur la réalisation de nouveaux alliages dentaires et leur mise en œuvre.

Vu :

Le Président :

Signé : P. CERNEA.

Vu :

Le Président de l'Université

René Descartes :

Signé : R. FRÉZAL.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris :

Signé : R. MALLET.

A N N E X E S

-4-1- BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON (J. N.) 1959
BATES (J. F.) 1959
The cobalt-chromium partial denture
BRITISH DENTAL JOURNAL vol. 107 N° 3&4 - p.p. 57-62
- ANDRIES (B.) 1969
Caractéristiques d'élasticité des alliages dentaires
du type stellite et nickel-chrôme.
RAPPORT UGINE-CARBONE - Oct. 1969
- ASGAR (Kamal) 1968
ALLAN (F. C.)
Microstructure and Physical properties of alloys
for Partial Denture.
JOURNAL OF DENTAL RESEARCH vol. 47
N° 2 - Mars - Avril 1968 - p.p. 189-197
- BARONE (J. J.) 1961
HUFF (R. L.)
DICKSON (G)
Surface roughness of gold castings
DENTAL PROGRESS vol. N° 2 - Jan. 1961
- BATAREC (H.) 1968
La prothèse décolletée
Restauration la plus rationnelle de l'édentation partielle.
MALOINE 1968
- BATES (J.F.) 1965
The mechanical properties of the cobalt-chromium
alloys and their relation to partial denture design.
BRITISH DENTAL JOURNAL vol. 119 - Nov. 1965
N° 9 p.p. 389-396
- BATES (J.F.)
Studies of the retention of cobalt-chromium partial dentures.
BRITISH DENTAL JOURNAL - N° 6 - Aug. 1968 - p.p. 97-102
- BATES (J.F.) 1965
Studies related to the fracture of partial dentures
Flexural fatigue of a cobalt-chromium alloy.
BRITISH DENTAL JOURNAL - Jun. 1965 - Vol. 118
N° 12 - p.p. 532-537

- BATES (J.F.)
Studies related to the fracture of partial dentures
The fonctional strain in cobalt-chromium dentures -
A prèliminary report.
BRITISH DENTAL JOURNAL - Jan. 1966 - Vol. 120
N° 2 - p. 79
- BONNELANCE (L.) 1956
Le frottement interne des métaux
GARDY-TAREX - Acacia Genève
Communication N° 10 - Déc. 1956
- BRAUN (J.D.) 1965
Réactions de la soudure avec l'or aux hautes températures
NOTES TECHNIQUES - vol. 58 - 1965
- BRUGIRARD (J.) 1970
Etude du comportement électrochimique des métaux et
alliages dentaires.
THESE LYON 1970
- BUCH (Af) 1956
Fatigue properties of pure metals
LUMUMBY Warsovie 42 Pologne 10 M. 1956
- CAUL (H.J.) 1960
CLABAUGH (W.S.)
SUSA (M.E.)
Procedure for the determination of the noble metal
content of dental gold alloys.
AMERICAN DENTAL ASSOC. JOURNAL Vol. 61 -
Oct. 1960 - p.p. 439-43.
- CAZAUD (R.) 1969
POMEY (G.)
RABBE (P)
JANSSEN (Ch)
La fatigue des métaux
DUNOD 1969
- COIQUAUD (Y.) 1953
Les crochets en prothèse partielle
Les jauges à rétention
REVUE DENT. FRANCE N° 5 - Sept. Oct. 1953
- COLEMAN (R.L.) 1928
Physical properties of dental materials
JOURNAL OF DENTAL RESEARCH N° 32 - Dec. 1928

- COLLETT (H.A.) 1969
Casting chrome-cobalt alloys in small laboratories
JOURNAL PROSTHETIC DENTAL
DENTAL TECHNOLOGY - Vol. 21 - N° 2
Febr. 1969 - p.p. 216-226
- MAC CULLOCH (W.T.) 1964
Application of thermicast principles to
cobalt-chromium dentures.
BRITISH DENTAL JOURNAL - Vol. 116 N° 8
p.p. 329 - 338
- DOCQ (M.) 1969
Stellites
ENCYCL. MED. CHIRURGICALE
TECHNOLOGIE DES MATERIAUX
STOMATOLOGIE 10 - 1969 - 23065 R 10
- DOCQ (M.)
Propriétés physiques générales des matériaux
ENCYCL. MED. CHIRURGICALE
TECHNOLOGIE DES MATERIAUX
STOMATOLOGIE 10 - 1969 - 23063 A 10
- DELUARD (P.) 1970
Vers une étude structurale moderne des alliages métalliques,
porcelaines & polyméthacrylates. Présent et avenir de leur
contrôle non destructif.
THESE 1970 - PARIS
- EARNSHAW (R.) 1961
Fatigue tests on a dental cobalt-chromium alloy
BRITISH DENTAL JOURNAL - Vol. 110 - N° 10 - Mai 1961
- EICKT (J.D.)
CAUL (H.J.) 1967
SMITH (D.L.)
RASBERRY (S.D.)
Analysis of gold and Platinum group alloys by X-Ray.
Emission with correction for interelement effects
APPLIED SPECTROSCOPY Vol. 21 - N° 5 - 1967
- ENGLER (von S.)
Das volumendefizit bei der Erstarrung metallischer
Schmelzen.
Z. METALLKUNDE Vol. 56 - N° 6 - 1965

- FICHELE (G.)
La rétention en prothèse partielle amovible
ACTUALITES ODONTOSTOMATOLOGIQUES Juin 1968
N° 82 - p.p. 151 - 177
- GELL (M.)
LEVERANT (G.R.) 1969
The characteristics of stage I fatigue fracture in a
high strength Nickel alloy
ACTA METALLURGICA Vol. 16 - April 1968
- HARCOURT (H.G.) 1961
Fracture of cobalt-chromium castings
BRITISH DENTAL JOURNAL Vol. 110 - N° 2
Jan. 1961 - p.p. 43-50
- HILLNHAGEN (von E) 1966
HEMPEL (M.)
Zug-Druck-Dauerschwingversuche an einer Kobalt-Chrom-
Wolfram-Nickel-Legierung im Temperaturbereich von
800 bis 1200°C.
ARCHIV. FUR DAS EISENHUTTENWESEN - 1966
Vol. 37 - N° 6
- HOLLENCACK (G.M.) 1947
SKINNER (E.W.)
Shrinkage during casting of gold and gold alloys
AMER. DENTAL ASSOCIAT. JOURNAL Vol. 34
Feb. 1, 1947 - p.p. 223-224
- Principes généraux de l'essai de fatigue des métaux
RECOMMANDATION ISO 1964
ISO/R 373 - 1^{ère} édition Août 1964
- JOHNSON (W.)
A comparaison of cobalt-chromium alloys and yellow
and white gold alloys.
DENTAL PRACTITIONER Vol. 8 - N° 1 - Sept. 1957
- LOCKOWANT (P.) 1964
SVENSON (A.)
Apparatur für Dauerschwingversuch.
DER DENTUMATT
ACTA ODONTOLOGICA SCANDINAVICA N° 22 5
Nov. 1964 - p.p. 557-77

- MASCOTTO (R.) 1968
NALLY (J.N.)
Préparation des échantillons pour étude de surface en or.
Revue mensuelle de la S.O.S. Vol. 78 N° 3 - 1968
- MASSERAN (J.) 1970
Le crochet à barre de torsion
ACTUALITES ODONTOSTOMATOLOGIQUES Juin 1970
N° 90 - p. 157-181
- MORRAL (F.R.) 1968
Alliages de cobalt pour prothèses
Traduction de B. ANDRIES Janv. 1968 - Ugine-Carbone
- PHILIPPS (R.) 1947
Etude sur la densité des coulées
AMER. DENTAL ASSOC. JOURNAL N° 5
Sept. 1947 - p.p. 329-342
- POHEY (G.) 1968
RABBE (P.)
Rupture de fatigue de pièces de machine, classification
et analyse.
DUNOD 1968
- SHELL (J.S.) 1963
NIELSEN (J.P.)
Study of the bond between gold alloys and porcelain.
BULLETIN OF THE SOUTHERN CALIFORNIA STATE
DENTAL LABORATORY SOCIETY - Aug. Sept. 1963
- SKINNER (E.W.) 1967
PHILLIPS (R.W.)
The science of dental materials
W.B. SAUNDERS C° Philadelphia & London - 1967
- SOUDER (W.H.) 1920
PETERS (C.G.)
An investigation of the physical properties of dental
materials
TECHN. JOURNAL N.B.S. N° 157 - May 1920
- SOYER (G.) 1970
Concordance de la rétention par crochets avec les
Origines biologiques de la prothèse décollée.
Thèse pour le Doctorat en Chirurgie Dentaire.
MALOINE 1970

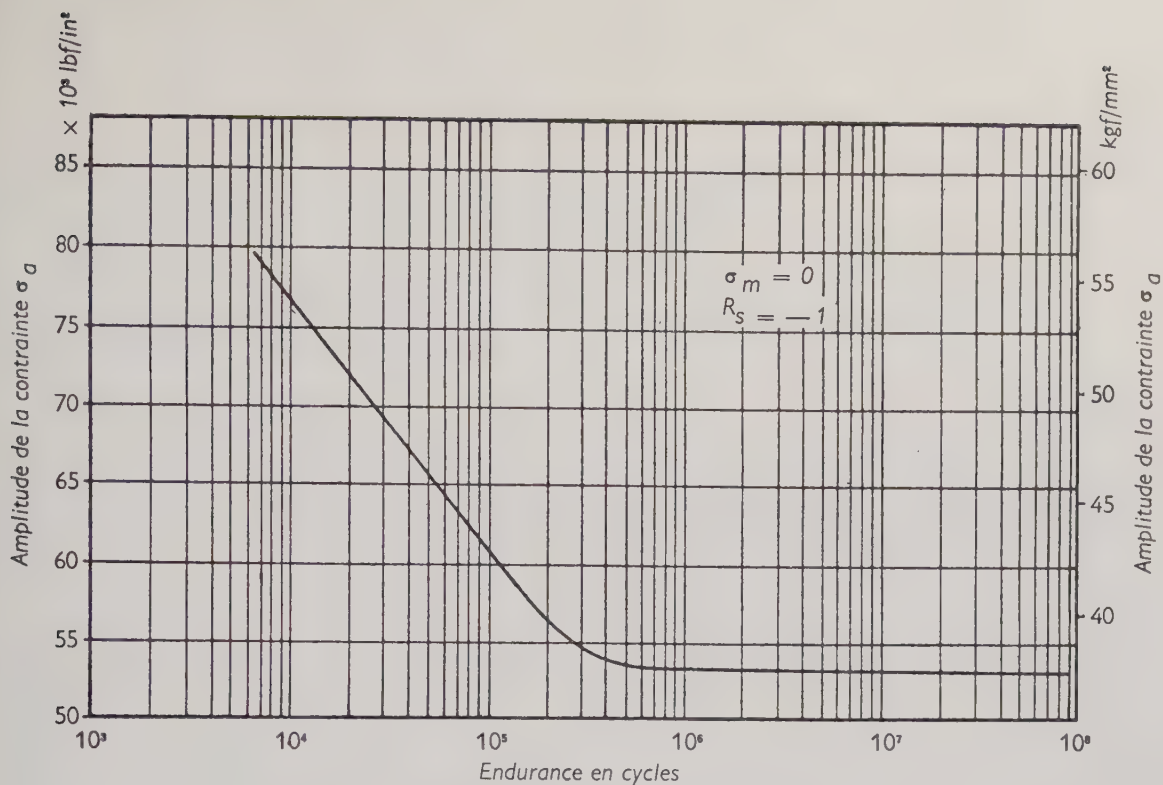
TAYLOR (D.F.) 1958
LEIBNNITZ (W.A.)
ADLER (A.G.)
Physical properties of cobalt-chromium denture alloys
AMER. DENT. ASSOC. JOURNAL Vol. 56
March 1958 - p.p. 343-351

-4-2- Cycle de Contrainte avec notation algébrique -

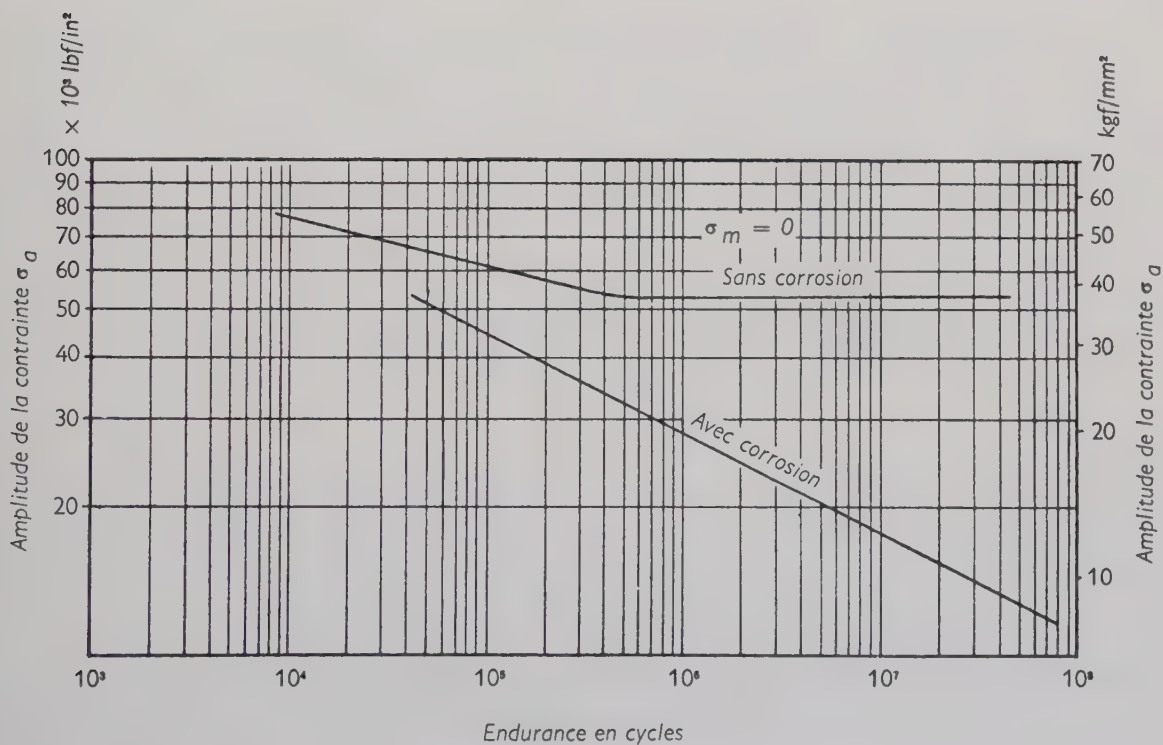
Symboles	Désignations	Définitions
$\sigma_{\max.}$	Contrainte maximale	La plus grande valeur algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte; une contrainte de traction (tension) est considérée comme positive et une contrainte de compression (pression), comme négative.
$\sigma_{\min.}$	Contrainte minimale	La plus petite valeur algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte; une contrainte de traction (tension) est considérée comme positive et une contrainte de compression (pression), comme négative.
σ_m	Contrainte moyenne	Composante statique de la contrainte: moyenne algébrique des contraintes maximale et minimale.
σ_a	Amplitude de la contrainte	Composante alternée de la contrainte: moitié de la différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale.
$2\sigma_a$	Etendue de variation de la contrainte	Différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale dans un cycle de contrainte.
n	Nombre de cycles	Nombre de cycles appliqués à un moment donné de l'essai.
f	Fréquence des cycles	Nombre de cycles appliqués par unité de temps (cycles par minute ou par seconde).
K_t	Facteur théorique de concentration de contrainte	Facteur de concentration de contrainte géométrique rapporté à la section nette et calculé conformément à la théorie de l'élasticité.
R_s	Rapport de contrainte	Rapport algébrique de la contrainte minimale à la contrainte maximale dans un cycle $\frac{\sigma_{\min.}}{\sigma_{\max.}}$

- Résistance à la fatigue -

Symboles	Désignations	Définitions
N	Endurance ou longévité à la fatigue	Nombre de cycles nécessaire pour que l'éprouvette périsse, généralement exprimé en fraction décimale ou en multiple de 10^6 .
σ_N	Résistance à la fatigue pour N cycles ou résistance à la fatigue sous endurance limitée	Valeur de la sollicitation pour laquelle l'éprouvette présenterait une longévité (qui peut être déterminée statistiquement) de N cycles.
σ_D	Limite de fatigue	Valeur, qui peut être déterminée statistiquement de la sollicitation au-dessous de laquelle un métal peut supporter un nombre illimité de cycles. Si σ_A est l'amplitude de la contrainte correspondant à la limite de fatigue, on a pour une valeur particulière de la contrainte moyenne σ_m $\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A$ NOTE. — Pour certains matériaux et certains milieux, on ne trouve pas de limite de fatigue.
n/N	Rapport de cycles	Rapport du nombre de cycles appliqués (voir par. 3.2.2) à l'endurance; utilisé dans les essais avec paliers de charge, en relation avec la courbe de Woehler.
K_f	Facteur de réduction de la résistance à la fatigue (rapporté à la section nette)	Rapport de la limite de fatigue sur éprouvettes lisses et polies à la limite de fatigue sur éprouvettes présentant un effet d'entaille. Le terme « effet d'entaille » est employé ici au sens large pour désigner non seulement l'effet d'une entaille proprement dite, mais encore, par exemple, celui de la corrosion préalable ou celui qui correspond à l'absence d'usinage. Si ce rapport est calculé à partir de résistances à la fatigue pour N cycles (σ_N), il dépend de N .



Courbe S/N (échelle linéaire de la contrainte)



Courbe S/N (échelle logarithmique de la contrainte)

Symboles et Courbes extraits de la recommandation
I.S.O./R. 373. - Année 1964 F. avec l'autorisation de l'Association
Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe
Seule fait foi la norme originale dans son édition la plus récente.

-4-4- FEDERATION DENTAIRE INTERNATIONALE -

Spécification n° 7 concernant les alliages d'or dentaires à couler
Adoptée par l'Assemblée Générale lors de la session annuelle de
juin-juillet 1963 à Stockholm, Suède.

1 - Sujet et classification-

1-1- Sujet. Cette spécification concerne les alliages dentaires à base d'or
utilisés pour la coulée lors de la fabrication de restaurations et d'appareils
dentaires (voir 6.1.).

1-2- Classification -

1-2-1- Types. Les alliages d'or dentaires à couler doivent appartenir aux
types indiqués ci-dessous:

- Type I Mou
- Type II Moyen
- Type III Dur
- Type IV Extra-dur.

2- Spécifications applicables -

2-1- Spécification. La spécification n° 2 de l'American Dental Association
concernant les revêtements pour la coulée des alliages d'or dentaires est
applicable aux paragraphes 3.2. et 4.4.1. Lorsqu'il existera d'autres
spécifications nationales concernant les revêtements pour la coulée, elles
seront également applicables. Toutes les spécifications nationales concernant
les revêtements pour la coulée seront applicables jusqu'à ce qu'une spécification
de la Fédération Dentaire Internationale concernant les revêtements pour la
coulée des alliages d'or dentaires soit approuvée. (Pour se procurer le texte
des spécifications de la Fédération Dentaire Internationale, s'adresser au
bureau du Secrétaire Général de la Fédération Dentaire Internationale,
64, Wimpole Street, Londres, W.1. Grande-Bretagne).

6-1- Emploi. Les quatre types d'alliages indiqués sont habituellement utilisés
pour les restaurations et appareils dentaires suivants :

- | | |
|----------|---|
| Type I | Travaux soumis à un effort très faible et que l'on désire brunir. |
| Type II | Travaux soumis à un effort modéré ; couronnes trois-quart,
ancrages, intermédiaires de ponts, couronnes et selles. |
| Type III | Travaux soumis à un effort élevé ; couronnes trois-quart minces,
minces contre-plaques coulées, ancrages, intermédiaires de
ponts, couronnes et selles. |

Type IV Travaux de section mince et soumis à un très grand effort,
selles, barres, crochets, couronnes, coiffes et châssis.

6-2. Références. Les références suivantes seront utiles à l'observateur chargé de déterminer la conformité des alliages d'or à couler aux exigences de cette spécification.

Brumfield, P.C. (1954) : Tentative standard methods of testing precious metal dental materials (Technical Committee, Dental Gold Institute). J. Amer.dent. Ass. 49, 17.

Coleman, R.L., Jr. (1928) : Physical properties of dental materials -(Gold alloys and accessory materials), Res Paper No 32, Bur.Standards J.Res 1, 867.

Taylor, N.O., Paffenbarger, G.C. and Sweeney, W.T. (1932) : Inlay casting golds : Physical properties and specifications, J.Amer.dent.Ass., 19, 36.

-5- TABLE DES MATIERES -

PAGES

1 - Sommaire	9
2 - Avant-propos	12
3 - Introduction	13
4 - Etude	14
1 - <u>Etude des crochets des appareils dentaires sous l'effet de torsion alternée -</u>	
1 - 1 - Crochets et fatigue	14
1 - 2 - Eléments de théorie générale sur la fatigue des métaux	18
1 - 3 - Influences mécaniques des conditions d'application des efforts sur la fatigue .	22
1 - 4 - Influences physiques sur la fatigue	24
1 - 5 - Influences chimiques et électrochimiques sur la fatigue	27
2 - <u>Etude des métaux utilisés pour la réalisation des crochets des appareils dentaires -</u>	
2 - 1 - Appareillage	28
2 - 2 - Matériaux et techniques utilisés pour la réalisation des éprouvettes	32
2 - 3 - Description des expériences	35
2 - 4 - Résultats	38
3 - <u>Interprétations et conclusions -</u>	
3 - 1 - Interprétations	93
3 - 2 - Conclusions	96
4 - <u>Annexes -</u>	
4 - 1 - Bibliographie	99
4 - 2 - Cycles de contraintes avec notations algébriques	105
Recommandation I.S.O. R.373.	
4 - 3 - Résistance à la fatigue - Recommandation I.S.O. R. 373	106
4 - 4 - Spécification n° 7 - F.D.I. 1963 sur les ors	107
5 - Tables des Matières -.....	109

